

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE
LA MAÎTRISE EN RESSOURCES RENOUVELABLES**

**PAR
ABDELHAMID SAOUDI
BACHELIER ÈS SCIENCES PHYSIQUE
DE LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE RABAT (MAROC)**

**UTILISATION DES RAPPORTS RADIOMÉTRIQUES
DE BANDES SPECTRALES DANS LA DISCRIMINATION
DES ESSENCES FORESTIÈRES PAR VIDÉOGRAPHIE
AÉRIENNE MULTIBANDE (VAM)**



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

RÉSUMÉ

Au Québec, l'inventaire forestier est une préoccupation importante des services forestiers puisqu'il constitue la base de fonctionnement de plusieurs phases de gestion liées à l'industrie forestière. La photo-interprétation conventionnelle et la télédétection satellitaire ne permettent pas de différencier avec certitude les essences forestières. La télédétection à haute résolution devient alors une nécessité permettant cette distinction.

La vidéographie aérienne multibande (VAM) fait appel à un capteur mis au point récemment pour répondre à cette problématique. En effet, grâce aux nouveautés apportées par ce capteur, le présent travail tentera d'évaluer ces potentiels pour la discrimination des essences forestières à l'aide des rapports radiométriques de bandes spectrales. Ces rapports peuvent réduire le nombre de composantes à traiter et diminuer considérablement tous les effets multiplicatifs. Les effets multiplicatifs ou erreurs systématiques, sont dus non seulement aux facteurs extrinsèques au capteur, mais aussi souvent aux capteurs eux-mêmes, pourvu que ces facteurs agissent de la même façon sur toutes les composantes. Les désavantages principaux de cette méthode résident dans la difficulté de choisir la meilleure combinaison de rapports lorsqu'il existe un grand nombre de composantes image et de faire l'ajustement nécessaire de

l'échelle des valeurs de sortie par plusieurs essais consécutifs. En effet, ces rapports peuvent varier de zéro à l'infini suivant les valeurs présentes dans les composantes. Un facteur d'échelle appliqué aux résultats doit donc être déterminé de telle sorte que la très grande majorité des valeurs soient comprises entre 0 et 255 niveaux de gris, si les composantes et les images-rapports sont stockées en 8 bits. Le facteur d'échelle est nécessaire si on veut visualiser les images-rapports sur écran cathodique. Enfin, si les données contiennent beaucoup de bruits additifs (l'effet de l'atmosphère par exemple) l'image résultante aura un aspect granuleux, puisque les bruits s'additionneront (Bonn *et al*, 1992). Dans ce cas, les bruits additifs seront éliminés par des soustractions radiométriques entre des images prises dans différentes bandes spectrales avant de réaliser les rapports radiométriques.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, le Dr René Verreault de l'Université du Québec à Chicoutimi, pour la supervision pédagogique, l'encouragement et l'enthousiasme démontrés durant l'étude. Les remerciements vont aussi au Dr Réjean Gagnon coordonnateur du Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale et également professeur à l'Université du Québec à Chicoutimi, pour le soutien financier qui a rendu possible cette étude.

Je tiens spécialement à remercier monsieur Frédéric Gagnon pour l'aide apportée lors des travaux de terrain ainsi que monsieur Stéphan Maclaughlin pour sa contribution à la réalisation du survol aérien des peuplements forestiers à étudier. De même, je m'en voudrais de passer sous silence l'encouragement et le support moral de la part des membres de ma famille.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
RÉSUMÉ	ii
REMERCIEMENTS.....	iv
TABLE DES MATIÈRES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	ix
CHAPITRE I. Introduction	1
CHAPITRE II. Cadre théorique.....	8
II-1) Définition de la réflectance.....	8
II-2) La réflectance de la végétation	9
II-3) La réflectance d'un couvert végétal.....	11
II-4) La réflectance d'une feuille.....	12
II-4-1) La structure d'une feuille.....	12
II-4-2) Action réciproque des feuilles et du rayonnement.....	13
II-5) Buts et objectifs.....	16
CHAPITRE III. Méthodologie.....	19
III-1) Sites à étudier.....	19
III-2) Le choix de la saison	21
III-3) Choix de l'altitude.....	21
III-4) Matériel utilisé.....	22
III-5) Correction optique des filtres et calibration du capteur.....	25
III-5-a) Corrections optiques des filtres.....	27
III-5-b) Calibration du capteur.....	27

III-6) Acquisition des données spectrales.....	39
III-6-a) Localisation des images de survol.....	39
III-6-b) Acquisition de la vérité-terrain.....	42
CHAPITRE IV. Résultats	46
IV-1) Traitement numérique des données.....	46
IV-1-a) Traitement numérique des images de survol	46
IV-1-b) Traitement numérique des images de la vérité-terrain.....	54
IV-2) Rapports des radiométries des bandes spectrales.....	60
IV-2-1) Correction des données spectrales par la fonction de calibration	60
IV-2-2) Les rapports des radiométries des bandes spectrales	60
IV-2-2-a) Approximations.....	60
IV-2-2-b) Les rapports radiométriques de bandes spectrales.....	65
IV-3) La correspondance entre les rapports de la vérité-terrain et ceux du survol	70
IV-4) La discrimination des essences forestières	76
CHAPITRE V. Interprétation des résultats.....	80
V-1) La situation	80
V-2) Les limites de la méthode.....	81
V-3) Les implications pratiques.....	82
CHAPITRE VI. Conclusion générale et recommandations.....	84
BIBLIOGRAPHIE	86

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1. La réponse du capteur CCD dans les cinq bandes spectrales....	32
Tableau 2. Linéarisation du capteur CCD	35
Tableau 3. Les coordonnées en longitude et en latitude pour la ligne de vol 1	40
Tableau 4. Les coordonnées en longitude et en latitude pour la ligne de vol 2	41
Tableau 5. Les coordonnées en longitude et en latitude pour la ligne de vol 3	41
Tableau 6. Les valeurs radiométriques avant et après filtrage pour le bouleau.....	50
Tableau 7. Les valeurs radiométriques avant et après filtrage pour le pin gris	51
Tableau 8. Les valeurs radiométriques avant et après filtrage pour l'épinette noire	52
Tableau 9. Les valeurs radiométriques avant et après filtrage pour le tremble	53
Tableau 10. Les valeurs radiométriques avant et après filtrage pour des feuilles de bouleau.....	56
Tableau 11. Les valeurs radiométriques avant et après filtrage pour des aiguilles de pin gris.....	57
Tableau 12. Les valeurs radiométriques avant et après filtrage pour des aiguilles d'épinette noire.....	58

Tableau 13. Les valeurs radiométriques avant et après filtrage pour des feuilles de tremble	59
Tableau 14. Les radiométries corrigées par la fonction de calibration pour le bouleau	61
Tableau 15. Les radiométries corrigées par la fonction de calibration pour le pin gris.....	61
Tableau 16. Les radiométries corrigées par la fonction de calibration pour l'épinette noire	62
Tableau 17. Les radiométries corrigées par la fonction de calibration pour le tremble	62
Tableau 18. Les radiométries corrigées par la fonction de calibration pour des feuilles de bouleau.....	63
Tableau 19. Les radiométries corrigées par la fonction de calibration pour des aiguilles de pin gris	63
Tableau 20. Les radiométries corrigées par la fonction de calibration pour des aiguilles d'épinette noire.....	64
Tableau 21. Les radiométries corrigées par la fonction de calibration pour des feuilles de tremble	64
Tableau 22. La correspondance entre les données du survol et celles de la vérité-terrain	71
Tableau 23. La discrimination des espèces forestières étudiées	77

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 01. Le spectre électromagnétique	3
Figure 02. La réflectance d'un végétal en fonction de la longueur d'onde	10
Figure 03. Structure interne d'une aiguille de Douglas taxifolié	14
Figure 04. Les tracés possibles du rayonnement dans une feuille.....	15
Figure 05. Les peuplements forestiers survolés	20
Figure 06. Système VAM, bloc laboratoire	24
Figure 07. La caméra vidéo multibande XYBION MSC-02	26
Figure 08. Schéma du dispositif expérimental de la calibration CCD.....	30
Figure 09. La réponse spectrale du capteur CCD du système vidéo	31
Figure 10. Réponse du capteur CCD dans les cinq bandes spectrales	33
Figure 11. Linéarisation du capteur CCD MSC-02 de XYBION	36
Figure 12. Calibration du capteur CCD	38

CHAPITRE I

INTRODUCTION

La gestion des ressources au Canada est confrontée au problème de l'immensité du pays. Ainsi elle a trouvé en la télédétection une solution à cette difficulté. Ce domaine d'étude offre de très grandes possibilités pour le relevé et la surveillance des vastes étendues de forêt.

D'une façon générale, la télédétection signifie la mesure ou l'acquisition d'informations sur certaines propriétés d'un objet ou d'un phénomène par un système d'enregistrement qui n'est pas en contact avec l'objet étudié (Bonn, 1979).

Ceci implique l'utilisation à distance d'appareillage servant à l'obtention d'informations telle que la mesure de champ de force, de radiation électromagnétique ou d'autres formes d'énergie.

Dans un sens plus restrictif, la télédétection signifie l'acquisition des données spectrales dans les longueurs d'ondes allant de l'ultraviolet jusqu'aux ondes radio du spectre électromagnétique, l'élaboration et la mise au point des méthodes qui permettent de classer, selon la longueur d'onde, toute l'énergie qui

se déplace à la vitesse constante de la lumière (voir spectre électromagnétique figure 1). En fait, la télédétection dépasse le domaine de la photographie aérienne, cette dernière étant restreinte à la partie visible et proche infrarouge du spectre. La détection d'information de la surface de la terre se fait dans des zones du spectre où l'atmosphère est transparente au rayonnement solaire, c'est-à-dire qu'elle possède une transmissivité élevée, d'où le nom de "fenêtres" atmosphériques. Les principales fenêtres se situent dans le visible, le proche infrarouge, l'infrarouge thermique et dans le domaine des hyperfréquences du spectre électromagnétique; la plus importante comprend une partie de l'ultraviolet (longueurs d'onde allant de 0,35 à 0,4 μm), tout le visible et une partie du proche infrarouge (jusqu'à 1,1 μm). L'infrarouge thermique possède deux fenêtres, soit une entre 3,5 et 4,2 μm et une entre 8 et 14 μm (voir fenêtres atmosphériques figure 1). Les procédés courants de télédétection utilisent peu les petites fenêtres comprises entre 1 et 3 μm , et se concentrent sur le domaine spectral compris entre 0,4 et 1,1 μm .

Les détecteurs (capteurs) d'information opérant dans la portion visible et proche infrarouge du spectre (0,35 et 2 μm) saisissent les ondes réfléchies du rayonnement solaire sur la surface de la terre à travers les fenêtres atmosphérique.

Cette réflexion peut être mesurée sur un intervalle spectral limité ou étendu et ne signifie pas la même chose suivant l'intervalle spectral. Il en résulte une courbe de réflectance spectrale ou "signature" caractéristique pour chaque surface de la terre, cette courbe étant utilisée dans la plupart des travaux de télédétection pour identifier cette surface.

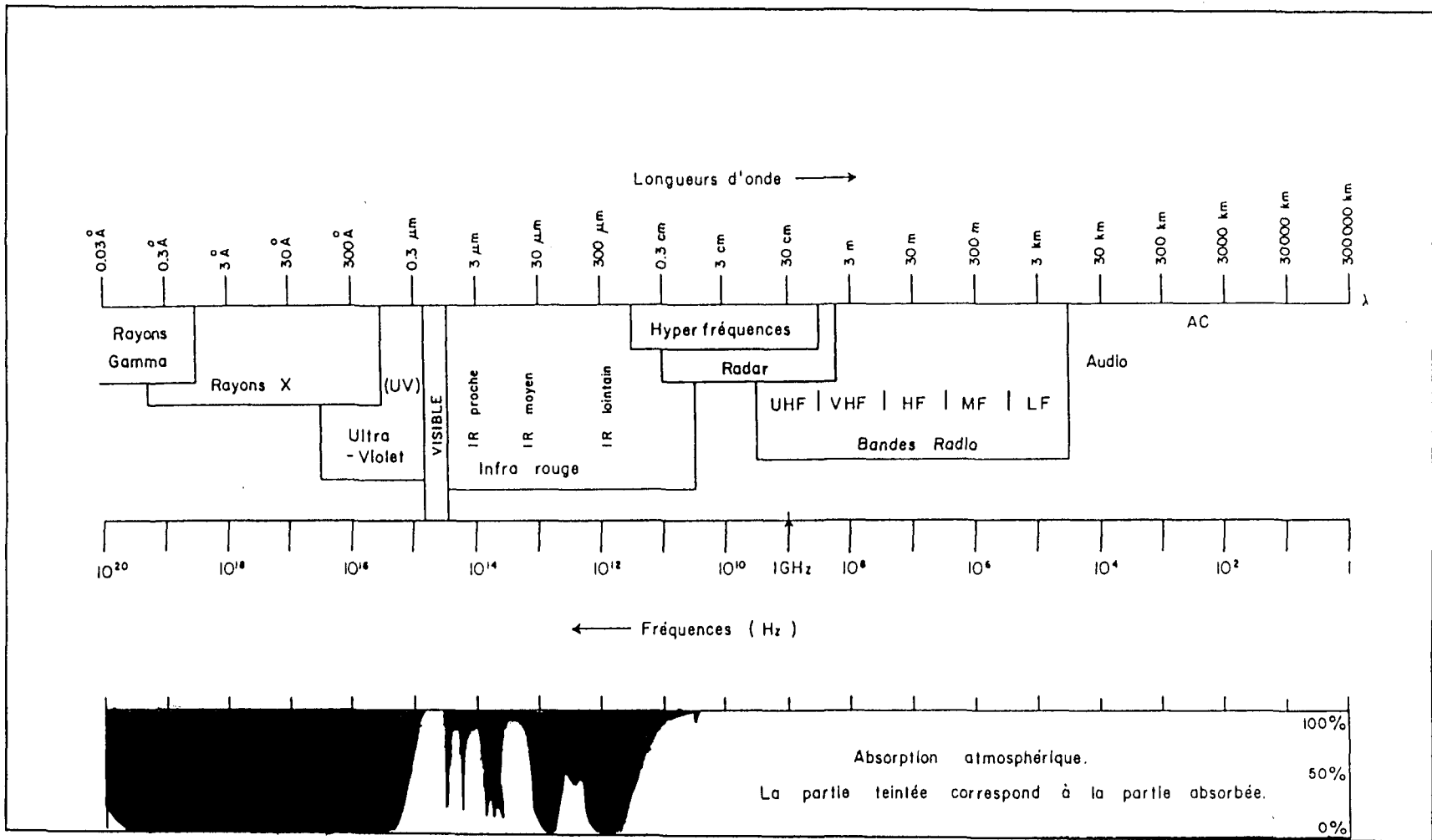


Figure 1. Le spectre électromagnétique (Bonn, 1979).

rapports radiométriques de bandes spectrales fournissent des bons résultats, en diminuant ces effets considérablement (King et Jerry, 1990).

Ces rapports sont utilisés pour corriger les différences d'illumination causées par la topographie (Vincent, 1973). L'indice de végétation obtenu par le rapport de la bande proche infrarouge sur la bande rouge réduit de 60 % à 90 % en moyenne l'effet de l'angle de visée sur la réflectance des surfaces végétales et des sols nus. Cependant les effets bidirectionnels dus à la variation angulaire de visée sont négligeables à travers une même image puisque l'angle d'ouverture du système VAM est très faible. On considère alors les effets bidirectionnels comme un bruit multiplicatif qui tend à s'annuler lorsque l'on divise une bande spectrale par une autre. Ceci est évidemment plus juste pour des bandes spectrales très voisines où les effets bidirectionnels sont comparables (Crane, 1971). Crane suggère de diviser une bande par un canal adjacent pour minimiser les effets bidirectionnels dus à la longueur d'onde, alors que Bonn *et al.* soulignent la difficulté de trouver les meilleures combinaisons de ces rapports pour éliminer ces effets. Le principal inconvénient de cette méthode réside dans le fait que l'image résultante ne correspond plus à une réponse spectrale mais à un rapport de réponses spectrales. Il est évident que les bandes adjacentes sont souvent très corrélées, contrairement à ce que l'on cherche dans la présente étude. Le choix des filtres est basé sur la recherche d'information dans des bandes spectrales qui ont un minimum de covariance, surtout lorsqu'on travaille dans un domaine spectral relativement étroit (visible et proche infrarouge) comme dans notre cas. Ainsi l'idée de Crane pour ces raisons pratiques, reste peu exploitable dans le domaine spectral où l'on

Les inventaires forestiers sont en général des opérations assez lourdes, compte tenu des superficies concernées, des quantités de données à collecter et des difficultés de circulation inhérentes au milieu forestier boréal. Les données de télédétection, en fournissant à un instant donné une image de la surface du sol dont on peut extraire des informations précises et actuelles, sont des outils indispensables pour mieux comprendre la région à étudier. La vidéographie aérienne multibande est un nouveau système qui est en nette progression à l'heure actuelle grâce à l'évolution très rapide des progrès de l'électronique. Plusieurs tentatives d'application de ce système en télédétection commencent à donner des résultats intéressants. En effet, les forestiers voient en ce système un nouvel outil d'aménagement forestier, étant donné ces avantages. L'acquisition des images est peu coûteuse pour les faibles aires. La sensibilité lumineuse est élevée et étendue sur une large partie du spectre électromagnétique. Les images sont visionnées pendant le vol, l'enregistreur électronique étant relié à un ordinateur pour le traitement des signaux (30 images par seconde pour la caméra à haute résolution et 60 champs par seconde pour la caméra à basse résolution). Le vol peut se faire à basse altitude grâce au capteur matriciel. En effet, les déformations géométriques inhérentes aux capteurs linéaires en atmosphère turbulente ne se manifestent pas. Les bandes spectrales très étroites dans le visible et le proche infrarouge sont accessibles.

Les effets bidirectionnels influencent la réflectance spectrale mesurée par télédétection. Ces effets dépendent des propriétés de réflexion de la cible et des perturbations atmosphériques en relation avec les conditions d'illumination et la géométrie de visée. La plupart des surfaces ont un mode de réflexion complexe caractérisé par une composante spéculaire, une composante diffuse et une

composante de rétrodiffusion appelée aussi anti-spéculaire. L'importance de chaque composante dépend d'un grand nombre de variables, principalement du type de couvert et de sa structure (Vanderbilt *et al.* 1981), de la géométrie du couvert et des conditions d'illumination.

D'autres effets restent à signaler. En effet, à cause de la géométrie des lentilles et de la nature de la réflectance des surfaces prises dans un champ, la radiation qui passe à travers les lentilles et atteint le détecteur CCD (Charge Coupled Device) n'est pas uniforme. Elle diminue radialement à partir du centre du détecteur comme une fonction de \cos^4 de l'angle d'observation référé à l'axe de visée pour la caméra à sténopé; ou comme \cos^3 de l'angle de la caméra bidimensionnelle. Le deuxième effet optique qui diminue l'éclairement en fonction du rayon par rapport au centre de l'image est le vignetage. En effet le blocage progressif de la radiation par les parois des lentilles et les montures de l'ouverture du diaphragme, a un effet multiplicatif réductif sur la luminance avec l'angle de prise de vue (Slater, 1980). Dans la télédétection aéroportée, les grandes ouvertures du diaphragme sont demandées si la largeur des bandes spectrales est petite ou si les prises d'images sont rapportées à des bandes spectrales larges aux extrêmes domaine de sensibilité spectrale de la caméra (King, 1992). Crowther en 1992 a utilisé un système laboratoire pour étudier le courant noir et la linéarité du capteur CCD aussi bien que les variations de l'irradiance de l'image à travers le plan du capteur CCD. Ces variations peuvent être largement éliminées par les rapports radiométriques de bandes spectrales puisque les bruits multiplicatifs sont dus souvent aux capteurs eux mêmes (Bonn *et al.* 1992). Les

travaille; cependant elle reste utilisable dans des cas où le domaine spectral est étendu.

CHAPITRE II

CADRE THÉORIQUE

Avant d'aborder les buts et les objectifs de cette recherche, il est nécessaire de rappeler certaines notions et définitions.

II-1) Définition de la réflectance

La réflectance d'une cible se définit comme le rapport de la radiation réfléchie sur la radiation incidente de ladite cible (Suits, 1983). La radiation incidente est la radiation qui provient de tout l'hémisphère de réflexion, c'est-à-dire l'hémisphère limité par le plan de la cible, qui contient la source de radiation. De la même façon, la radiation réfléchie désigne toute la radiation qui est réfléchie dans l'hémisphère de réflexion. Trois composantes caractérisent la distribution de la radiation réfléchie dans l'hémisphère de réflexion: 1) la radiation spéculaire, 2) la radiation diffuse, 3) la radiation réfléchie dirigée vers la source ou anti-spéculaire (Suits, 1983). Une domination de la radiation réfléchie diffuse implique que la radiation est réfléchie uniformément dans toutes les directions de l'hémisphère de réflexion. La cible sera alors une surface lambertienne. Une domination de la radiation réfléchie directe implique que la plupart de la radiation est réfléchie selon une direction particulière. Si la radiation réfléchie se dirige surtout dans le sens de retour vers la source, on parle alors d'une réflexion anti-spéculaire. La télédétection s'effectue par une mesure de la radiation réfléchie ou

émise par une surface. La radiation réfléchiée par une surface varie en fonction de la longueur d'onde et suivant la nature de la surface mesurée (Suits, 1983).

II-2) La réflectance de la végétation

La "signature" spectrale est une courbe de la réflectance spectrale en fonction de la longueur d'onde (figure 2). La réflectance d'un végétal résulte essentiellement des propriétés optiques de ses feuilles (Guyot, 1980). La variation de la réflectance d'une feuille en fonction de la longueur d'onde produit une "signature" caractérisant un objet bien déterminé (figure 2). Dans le domaine du visible (400 à 700 nm), la réflectance de la feuille est faible et sa transmittance est aussi très faible. La radiation est fortement absorbée par les pigments foliaires, principalement par la chlorophylle. Ces pigments ont principalement deux bandes d'absorption, dans le bleu (475 nm) et dans le rouge (700 nm), produisant ainsi une réflectance maximum dans le jaune-vert (550 nm) (Grant, 1987). D'une façon générale, la réflectance d'un sol nu, augmente progressivement avec la longueur d'onde. Dans le domaine du proche infrarouge (700 à 1300 nm), la réflectance de la feuille est très élevée. Il n'y a pas d'absorption par les pigments foliaires; la radiation est fortement réfléchiée ou transmise par les cellules internes de la feuille (Grant, 1987). Il y a donc une très forte hausse de la réflectance au-delà de 700 nm, c'est la montée du rouge (red edge), suivie d'un plateau. Le niveau du plateau est déterminé par: 1) la densité des cellules internes de la feuille (Grant, 1987), 2) l'empilement des feuilles (Gausman, 1983), 3) la teneur en eau (Gausman, 1983), 4) l'âge des feuilles (Gausman, 1983). Pour un sol nu, la hausse progressive se poursuit, mais les valeurs de la réflectance sont inférieures à celles des végétaux.

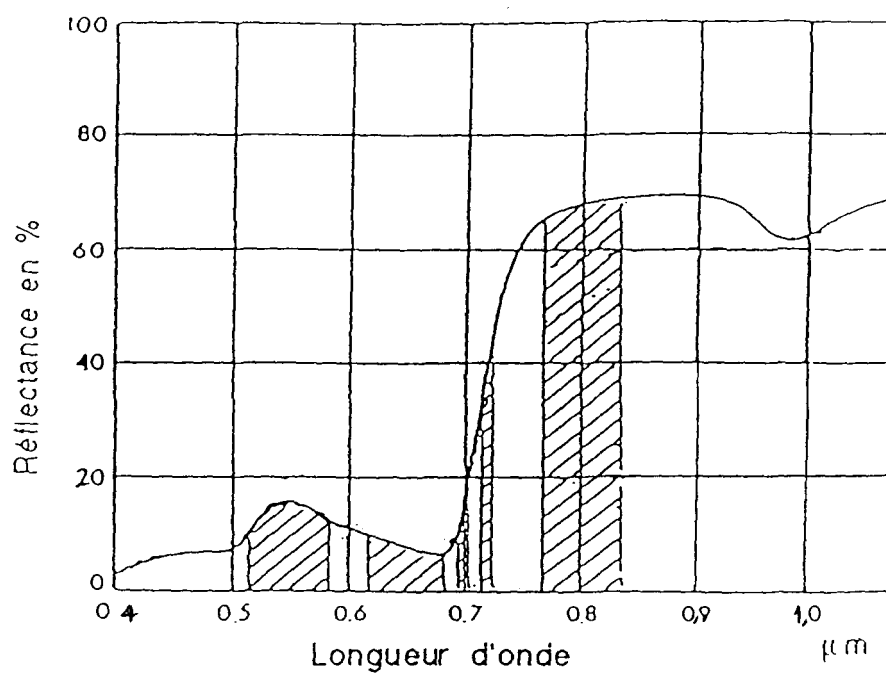


Figure 2. La réflectance d'un végétal en fonction de la longueur d'onde (λ),
(Weber et Polcyn, 1979).

II-3) La réflectance d'un couvert végétal

La combinaison des propriétés optiques des deux composantes, les végétaux et le sol (Guyot, 1980) constitue ce qu'on appelle la réflectance d'un couvert végétal. Plusieurs facteurs produisent des variations de la réflectance du couvert; ils se subdivisent en deux catégories: 1) les facteurs internes, 2) les facteurs externes.

Les propriétés optiques du sol environnant, la structure géométrique du couvert, la densité du feuillage et les propriétés optiques des feuilles (Colwell, 1974) sont les facteurs internes dont dépendent le couvert végétal. Le couvert végétal n'est pas une surface lambertienne, il y a un phénomène de réflexion anti-spéculaire (rétrodiffusion), appelé la tache chaude. Pour une position solaire donnée, on observe un maximum de la réflectance à un angle de réflexion déterminé par le port des feuilles (Gerstl, 1986). En effet ces feuilles peuvent avoir des attitudes horizontales, obliques ou pendantes.

L'instrumentation, la position du capteur, la longueur d'onde, la dimension de la surface mesurée, la position du soleil, les conditions atmosphériques; la force et l'orientation du vent (Colwell, 1974), sont les facteurs externes indépendants du couvert végétal. Les facteurs externes sont influencés par les contributions optiques de la végétation et du sol. En effet, pour un couvert végétal incomplet, un capteur positionné au nadir mesure une plus grande contribution du sol qu'un capteur positionné à 45 degrés par rapport à la verticale (Guyot, 1984). Les facteurs externes ont des effets multiplicatifs sur la radiométrie des images (la longueur d'onde (λ) et la position du capteur et du soleil). Nos objectifs visent à les éliminer par les rapports radiométriques de bandes spectrales.

II-4) La réflectance d'une feuille

Lorsque le rayonnement solaire atteint l'arbre, il est essentiellement intercepté par les feuilles, et c'est la réflectance spectrale de ces structures qui est en grande partie décelée par les télédéTECTEURS. L'action réciproque du rayonnement et des feuilles dépend de nombreux facteurs, tels que la structure et la composition cuticulaire, les inclusions cytoplasmiques, les pigments, la teneur en eau, la température, les caractéristiques d'émissivité et les saisons. Cependant, une fois les feuilles d'un arbre développées, leurs propriétés spectrales restent assez stables, à moins que l'arbre ne soit soumis à une tension résultant d'une contrainte ou du vieillissement naturel.

II-4-1) La structure d'une feuille

La figure 3 montre la structure cellulaire d'une aiguille normale de pin Douglas taxifolié à deux stades de sa croissance. Les feuilles très jeunes sont formées d'une couche externe de cellules épidermiques (e), d'un mésophylle compact (m) comportant peu d'espaces libres, de deux canaux résinifères (r) se prolongeant sur le pourtour de la feuille et d'un groupement vasculaire central (vb) (figure 3-a). À maturité, l'aiguille du Douglas taxifolié perd sa structure compacte et se compose de grandes cellules lobées de mésophylle spongieux (sm) séparées par de grands trous (as), et de parenchyme palissadique (pp) (figure 3-b). Ces cellules, de même que les cellules épidermiques, contiennent de nombreux chloroplastes. Au cours de la maturation, une cuticule épaisse se forme sur l'épiderme; la cuticule se couvre ensuite d'une couche de cristaux tubulaires cireux (Thair et Lister, 1975). Des stomates se développent en deux

bandes parallèles de 6 à 10 rangées des deux côtés de la nervure médiane du paratrachéal abaxial (surface inférieure); ils sont incrustés d'une épaisse couche de cristaux cireux. Aucun stomate ne se forme sur le parenchyme paratrachéal adaxial (surface supérieure).

II-4-2) Action réciproque des feuilles et du rayonnement

Lorsque le rayonnement solaire atteint les feuilles, il se produit différentes réactions comme l'indique la figure 4. Une faible partie du rayonnement est immédiatement réfléchi par la cire cuticulaire. La dispersion se poursuit dans le mésophylle spongieux lorsque le rayonnement atteint les espaces intercellulaires (Gausman, 1974).

Une grande partie de ce rayonnement, conjointement avec le rayonnement réfléchi directement par les éléments cellulaires (Gausman, 1977), est réfléchi de nouveau en traversant l'épiderme de la feuille. Le rayonnement qui reste passe dans la feuille: c'est ce qu'on appelle le rayonnement transmis. Lorsque ce rayonnement traverse la feuille, certaines de ses longueurs d'onde sont absorbées par les éléments internes de la feuille tels que les chloroplastes et l'eau cellulaire (Colwell, 1963). Tout le rayonnement qui atteint la feuille est ainsi réfléchi, transmis ou absorbé.

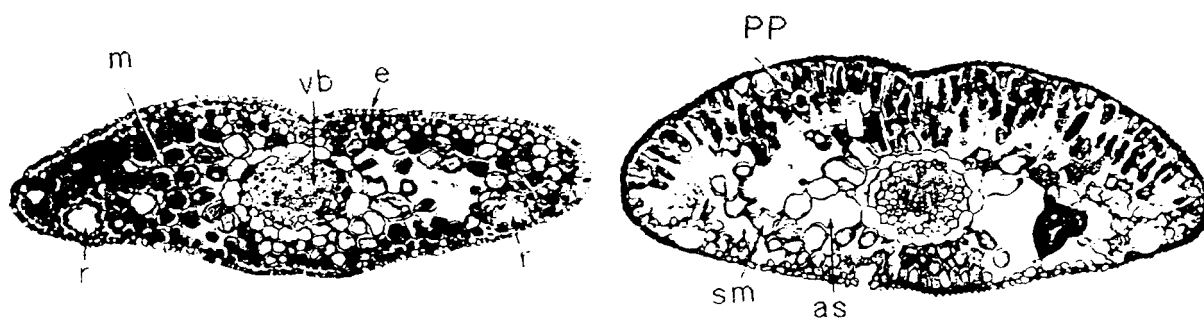


Figure 3-a

immature .

Figure 3-b

mature .

Figure 3. Structure interne d'aiguille de Douglas taxifolié,
(George, 1981).

m, mésophylle; vb, faisceau vasculaire; e, épiderme;

r, canaux résinifières; pp, parenchyme palissadique;

sm; mésophylle spongieux; as, espace libre .

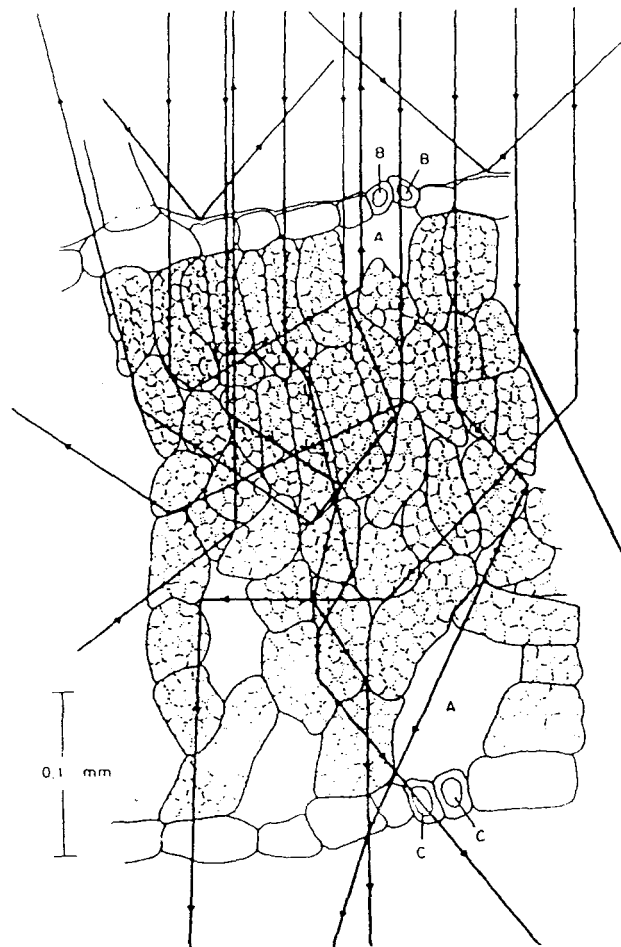


Figure 4. Coupe d'une feuille montrant les tracés possibles du rayonnement,

(George, 1981)

A- cavité substomatale,

B- partie supérieure des cellules de garde,

C- partie inférieure des cellules de garde

II-5) Buts et objectifs

Le but de cette recherche est premièrement d'évaluer le potentiel de la VAM comme un nouvel outil d'aménagement forestier, étant donné ses avantages techniques de plus grande performance par rapport aux capteurs linéaires MEIS, CASI, DAEDALUS, etc. Ces avantages cités au chapitre I nous permettent de supposer que le capteur matriciel VAM sera supérieur au capteur linéaire pour des applications en foresterie. Deuxièmement, ce système n'est pas un radiomètre absolu. Ainsi, plusieurs corrections s'avèrent indispensables, telles que la calibration du capteur CCD et la transformation de la radiométrie en pourcentage de réflectance. En effet les erreurs systématiques (effets bidirectionnelles dus aux paramètres angulaires définis par les angles zénithaux entre le capteur le soleil et la cible ainsi que l'effet de la longueur d'onde et l'altitude) qui affectent les images brutes sont considérées par plusieurs auteurs comme un bruit multiplicatif qui tend à s'annuler lorsqu'on divise la radiométrie d'une bande par celle d'une autre bande. Par conséquent, dans la présente étude, on suppose préalablement que les différentes espèces d'arbre grâce à la chlorophylle et aux autres pigments qu'elles contiennent réfléchissent les radiations électromagnétiques différemment selon l'utilisation des bandes spectrales distinctes. Il y aura donc analyse numérique d'image avec ces bandes spectrales particulières afin de vérifier la possibilité de discriminer les essences forestières à l'aide des rapports radiométriques de bandes spectrales. Si cette analyse s'avèrent positive, il y aura distinction fine entre différentes espèces forestières et détermination de la limite de la réflectance d'une espèce à une autre. Pour atteindre ce but, après correction chromatique des filtres optiques et

calibration du capteur CCD, on propose trois méthodes simples de traitement des images en négligeant l'effet de l'atmosphère (chapitre III) : 1) les rapports radiométriques des bandes spectrales deux à deux; 2) les rapports des rapports normalisés; 3) les rapports radiométriques de deux bandes moyennes. Ces traitements comportent l'élimination des erreurs systématiques géométriques dues aux paramètres angulaires (Vincent, 1984) par de simples rapports radiométriques de bandes spectrales et par les rapports de combinaisons de radiométrie de ces bandes. Quant aux erreurs systématiques dépendant de la longueur d'onde, elles peuvent être éliminées par les rapports des rapports normalisés. Ainsi les mêmes rapports obtenus à partir des données de survol seront comparés à ceux de la vérité-terrain qui seront pris comme une référence. Autrement dit, on se propose de tester si les moyennes μ_1 (vérité-terrain) et μ_2 (survol) des rapports radiométriques de bandes spectrales de deux populations distinctes peuvent être ou non considérées comme inégales. Le but serait atteint lorsque l'hypothèse $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ est vérifiée dans le cas d'une correspondance entre les données de la vérité-terrain et celles du survol. Dans le cas de la discrimination des essences forestières c'est sa négation qu'il faut tester, c'est-à-dire $H'_0 : \mu'_1 \neq \mu'_2$.

Le plan adopté est le suivant: un premier chapitre a décrit la télédétection d'une manière générale. Le second chapitre fait appel à certaines notions et définitions importantes et présente les objectifs et les buts de la présente recherche. Le troisième chapitre décrit le matériel utilisé et la méthodologie. Le chapitre suivant traitant des résultats, une première partie est consacrée à la correspondance entre les données de la vérité-terrain et celles du survol et la

seconde à la discrimination entre les espèces forestières. L'interprétation des résultats est contenue dans le cinquième chapitre. Le dernier chapitre est consacré aux conclusions et aux recommandations.

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE

III-1) Sites à étudier

Les sites qui font l'objet de cette recherche ont été choisis avec la collaboration de la compagnie Abitibi-Price (figure 5). Il s'agit des peuplements forestiers suivants: pessières noires, bétulaies, peupleraies, sapinières et des peuplements de pin gris. Les lignes de vol ont été tracées de façon à passer par le maximum de variétés de peuplements. Ainsi, trois lignes de vol étaient suffisantes pour couvrir tous les types de peuplements qui sont indiqués sur la carte. Cependant, après visite sur le terrain, la sapinière mentionnée sur la carte ne correspondait pas à la vérité-terrain. En effet, un seul sapin a été observé mais il ne se trouvait pas sur les images de survol. Par conséquent on a exclu le sapin de la présente étude. L'âge des arbres est supposé uniforme dans chaque peuplement d'après les données de la compagnie Abitibi-Price.

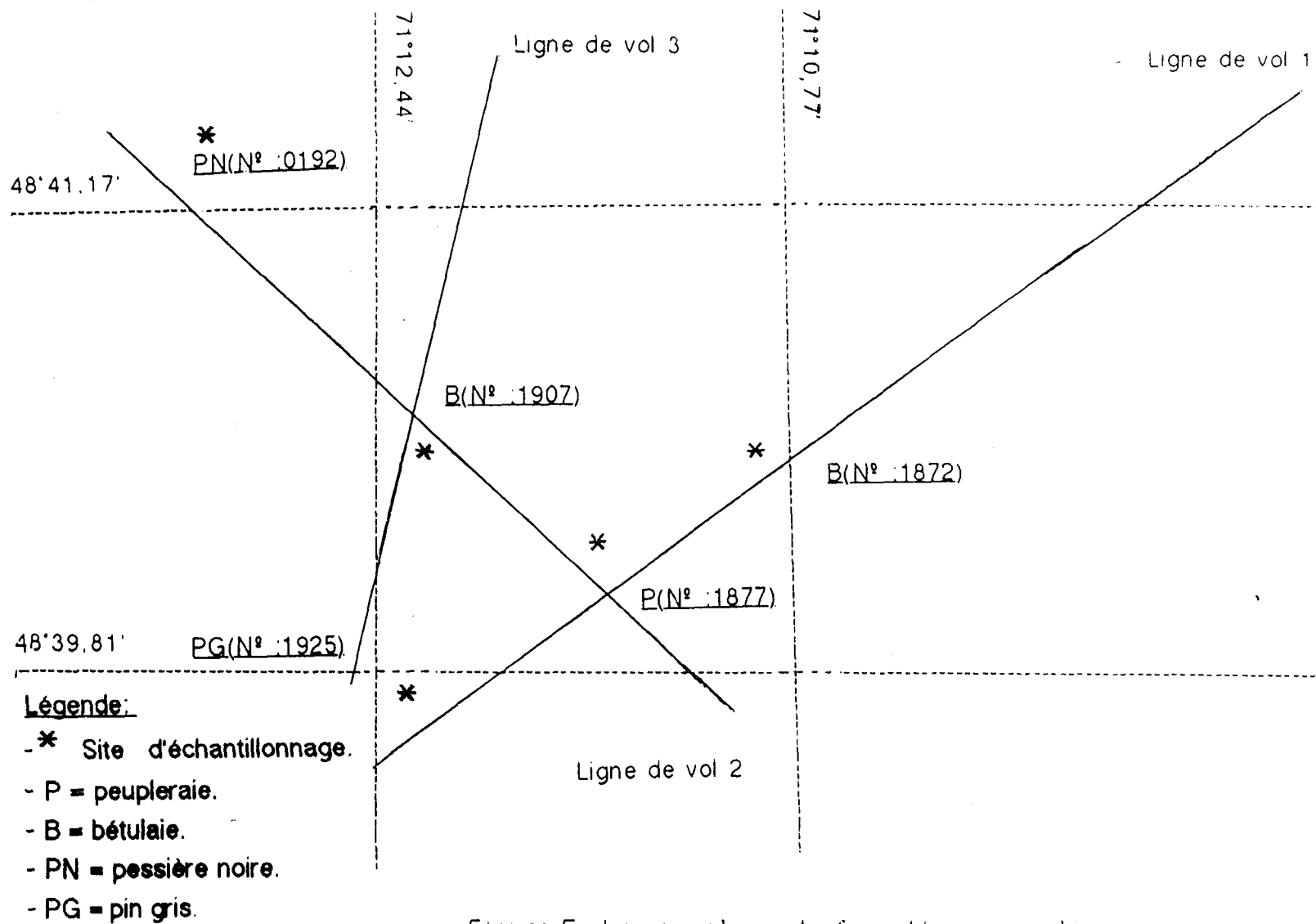
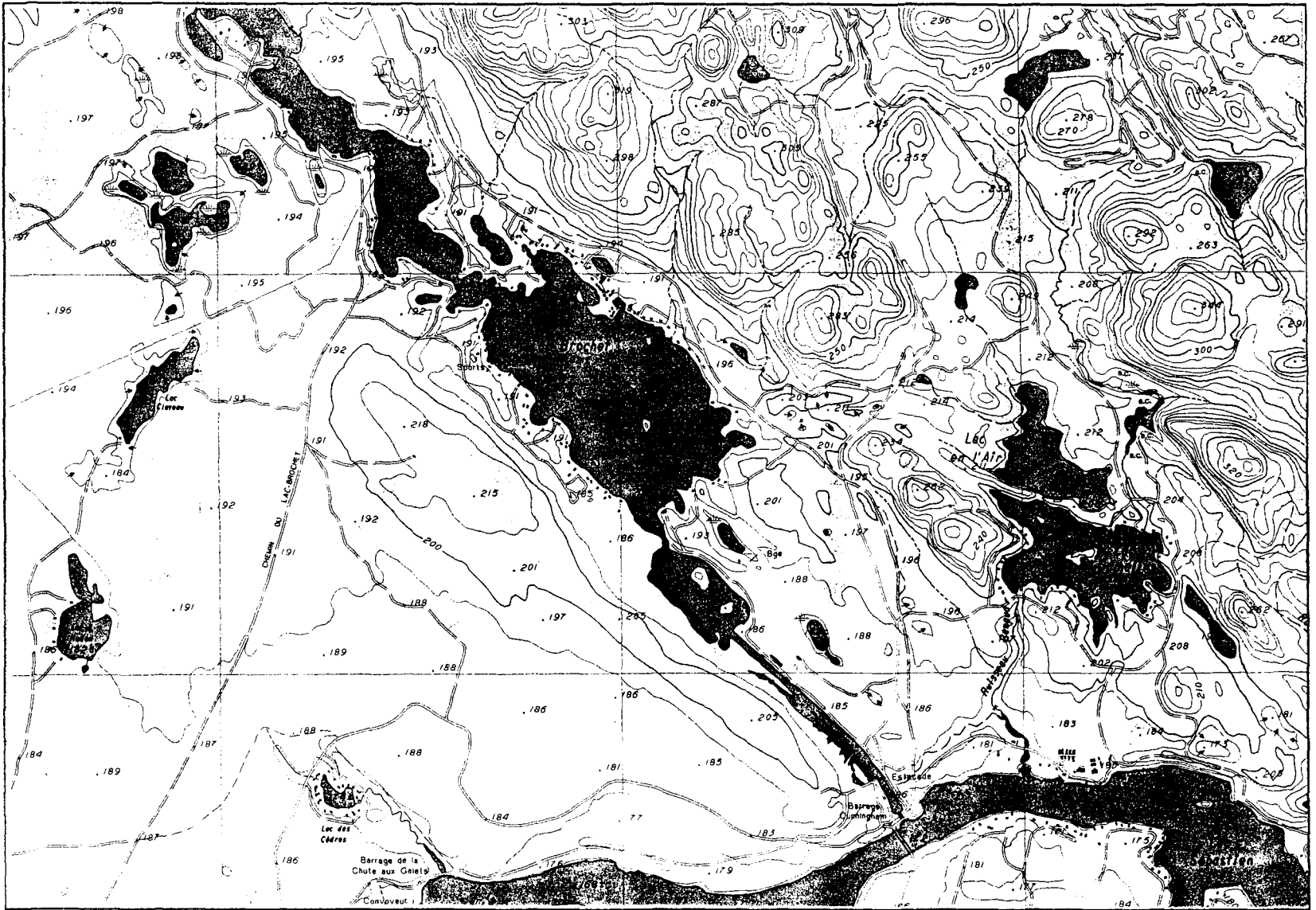


Figure 5. Les peuplements forestiers survolés.

Source: Saint-David-De-Falardeau (22D11-200-0202)

Échelle: 1cm = 316m.



III-2) Le choix de la saison (Variabilité phénologique de l'indice de végétation normalisé NDVI)

Les raisons majeures de la variabilité des caractéristiques spectrales des arbres incluent les conditions d'illumination et d'observation, les données météorologiques et la phénologie des plantes. Ce dernier paramètre peut être décrit par les variations de l'indice de végétation normalisé (NDVI) durant la succession des mois de l'année (Kharuk, 1992). L'étude menée par Kharuk, a montré que le mois de septembre offre un moment opportun pour faire des survols correspondant à nos objectifs. En effet à ce moment, l'indice de végétation des feuillus commence à chuter sans être nul, alors que celui des conifères reste plus ou moins stable au cours de l'année, sauf si une contrainte stressante imprévue s'impose.

III-3) Choix de l'altitude

La capture matricielle des images du système VAM nous permet de survoler à basse altitude car, en général, les turbulences de l'air n'ont pas d'effet majeur sur la géométrie des images acquises. Lorsqu'il y a lieu, une image défectueuse peut être remplacée par l'image suivante ou l'image précédente sans faire de correction géométrique. On a donc opté pour une altitude de 300 m, ce qui compense la perte de couverture latérale par une résolution de 70 cm/pixel.

III-4) Matériel utilisé

- Plate-forme

Les images ont été prises verticalement à partir d'un monomoteur de type Piper Warrior II avec une ouverture au plancher pour la caméra vidéo XYBION MSC-02.

- Le choix des filtres

La "signature" spectrale d'un végétal, selon sa nature, consiste en de légères variations dans la forme de la courbe de la figure 2. Ainsi le choix des filtres (partie hachurée de la figure 2) a été fait selon cette forme, pour chercher le maximum d'information qui est utile à notre travail. On a opté alors pour les cinq filtres suivants:

- $550 \text{ nm} \pm 35 \text{ nm}$ (vert); où l'on détecte un premier pic de réflectance d'un végétal;

- $650 \text{ nm} \pm 35 \text{ nm}$ (jaune-rouge); c'est une bande qui nous permet de distinguer facilement le sol nu de la végétation. En effet les pigments foliaires absorbent fortement le rayonnement dans cette bande, contrairement au sol nu qui présente son maximum de réflectance pour le visible. En outre, cette bande nous permet la détection du rougissement des feuilles d'érable, ce qui facilite la distinction entre le sol nu, l'érable et les autres arbres;

- $700 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$ et $725 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$; ces filtres sont choisis de façon à détecter progressivement la montée brutale de la réflectance d'un végétal, d'où leurs bandes passantes étroites;

- $800 \text{ nm} \pm 35 \text{ nm}$ (proche infrarouge); dans cette bande, l'absorption du rayonnement par le végétal est presque nulle, correspondant à un maximum de la réflectance sous forme d'un plateau horizontal au niveau de la "signature" spectrale. Cette bande est très utile, car elle nous permet de trancher sur l'espèce

d'arbre qu'on voit sur l'image, en particulier grâce la distinction visuelle à l'écran cathodique entre les conifères et les feuillus.

-Utilisation du GPS ("Global Positioning System")

Le GPS est un appareil qui sert, pendant le survol, à déterminer les coordonnées en longitude et latitude du centre d'une image. Il nous a été utile pour retrouver dans l'enregistrement vidéo les peuplements forestiers indiqués sur la carte (Figure 5). Ces coordonnées sont inscrites au bas de l'image ainsi que la date et l'heure de l'enregistrement.

- Schéma du dispositif expérimental (figure 6)

Ce schéma correspond à la partie "bloc laboratoire" du système VAM. Il comprend un magnétoscope S-VHS pour le défilement de l'enregistrement de l'information captée par la caméra XYBION MSC-02. Le deuxième magnétoscope correspond au bloc opérationnel dans l'avion pour enregistrer les informations du survol. Un ordinateur 486DX-50 dans lequel on a incorporé la carte XYBION IMCAP-01 permet d'afficher sur le moniteur 1 le menu du logiciel "XICAS" conçu spécialement pour le traitement des images vidéo, qui sont affichées sur le moniteur 2. Une imprimante HP DESKJET 500C peut imprimer le texte qui se trouve sur le moniteur 1 ainsi que les images vidéo, et une imprimante HP 300XL sert plus particulièrement pour l'impression de mosaïques éventuelles faites à partir des images vidéo à l'aide du logiciel TNTmips.

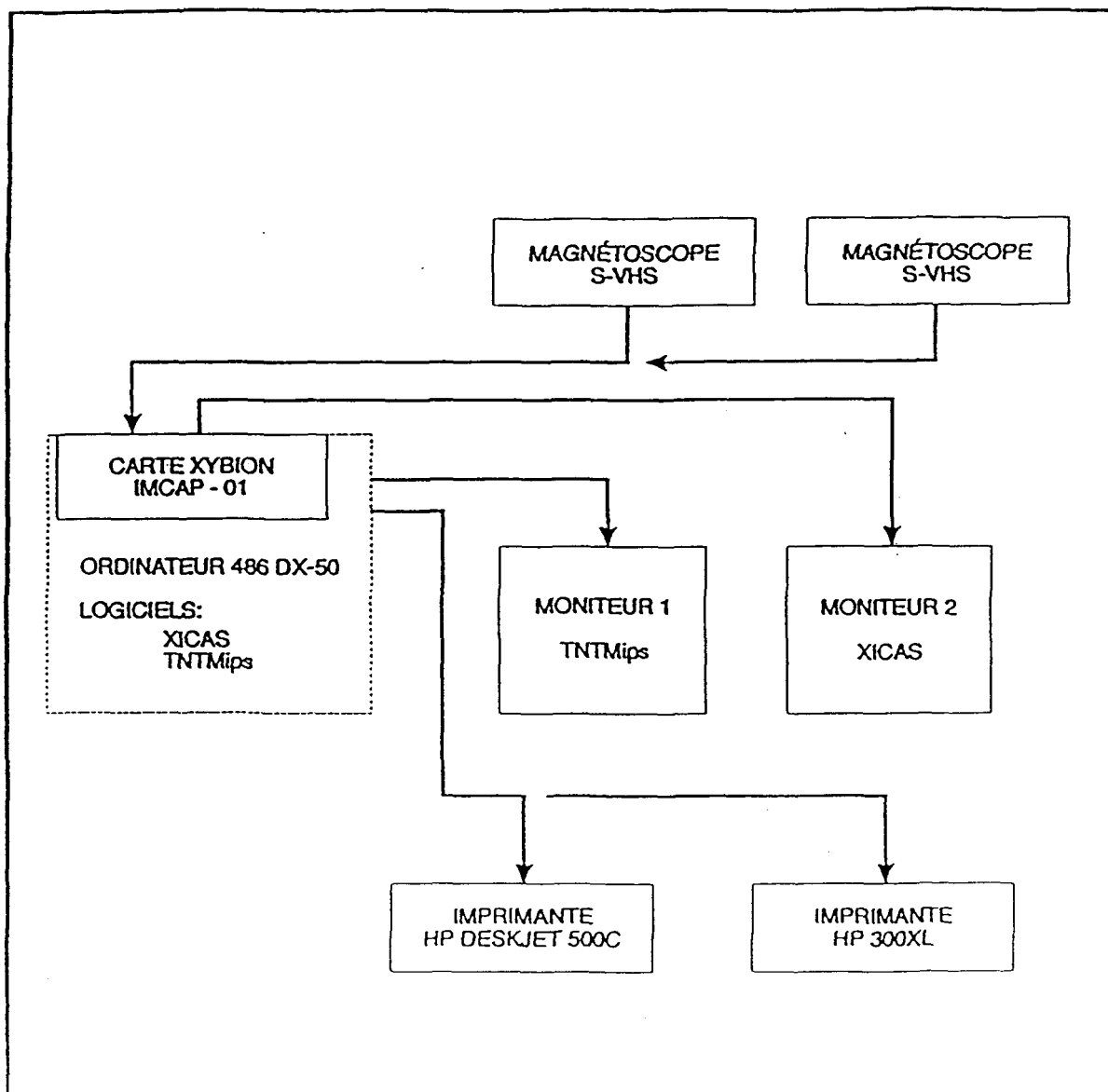


Figure 6. Système VAM, bloc laboratoire

- Caméra multibande utilisée dans le survol (figure 7)

L'acquisition des images se fait à l'aide d'une caméra multibande XYBION MSC-02, dans la configuration 60 champs/seconde. Cette caméra est composée d'un objectif, d'une roulette à filtres, d'un moteur et d'un capteur matriciel CCD. Cinq des six emplacements de filtres ont été utilisés pour l'expérience, conformément aux bandes spectrales décrites précédemment. La roulette à filtres tourne à une vitesse de 10 tours à la seconde, en synchronisme avec la prise d'image. À chaque fois qu'un filtre est exposé devant le CCD, l'avion s'est déplacé entraînant ainsi un léger décalage entre les prises de vues. Ce décalage, en relation avec la vitesse de l'avion, est relativement petit, de sorte qu'un arbre est vu approximativement sous le même angle pour les cinq bandes spectrales consécutives défilant en cinq sixième de seconde.

III-5) Correction optique des filtres et calibration du capteur

À plusieurs occasions avant ce projet, en expérimentant avec la caméra XYBION MSC-02 d'origine, on a remarqué plusieurs phénomènes qui tendent à perturber l'acquisition des données et fausser l'information requise. Il s'agit plus spécialement de deux phénomènes : la saturation du capteur avant d'atteindre le niveau de gris 255 et une différence entre les distances focales associées à chaque filtre, c'est-à-dire qu'il existe certaines longueurs d'onde qui ne convergent pas sur le capteur CCD. Par conséquent, certaines corrections étaient nécessaires afin d'ajuster le mieux possible l'appareillage utilisé dans l'expérience.

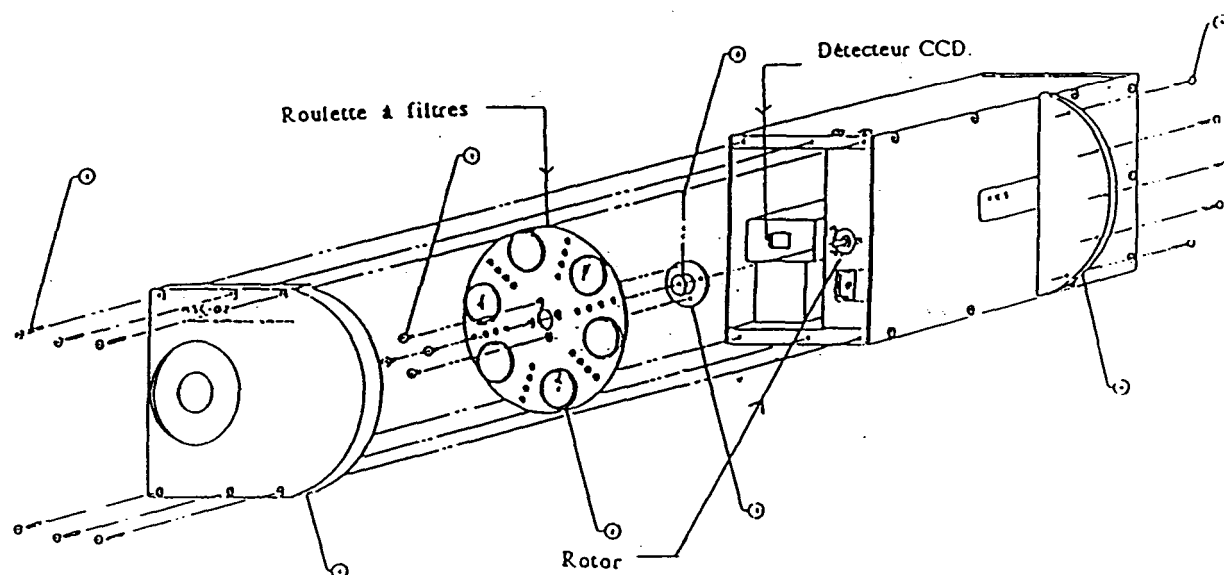


Figure 7. La caméra vidéo multibande XYBION MSC-02, d'après "XYBION ELECTRONIC SYSTEMS CORPORATION".

III-5-a) Corrections optiques des filtres

Pour faire converger chaque faisceau lumineux issu d'un filtre sur le capteur CCD, on a utilisé une méthode développée par Verreault (communication personnelle). Il fallait prendre comme référence un filtre dont le faisceau lumineux converge le plus loin sur le capteur CCD, puis coller des plaques de verre aux autres filtres dont les faisceaux lumineux convergent en-deçà du capteur CCD pour les ramener sur le même point d'impact que le filtre de référence. Ceci est possible connaissant l'indice de réfraction du verre. En effet, grâce à un pied à coulisse électronique on détermine la distance d qui sépare les positions de mise au point de chaque filtre au point de référence sur l'axe optique. Cette distance nous permet de déterminer, pour chaque longueur d'onde, l'épaisseur des plaques de verre qu'il faut coller grâce à la formule suivante:

$$e = ((n-1)*d)/n;$$

où n = indice de réfraction du verre;

d = distance qui sépare le point de référence de l'endroit;
de la mise au point de chaque filtre;

e = épaisseur de la plaque de verre à coller à chaque filtre.

III-5-b) Calibration du capteur

Les détecteurs CCD ne sont pas strictements linéaires. De plus, d'autres mécanismes tels que l'enregistrement et la lecture de l'information peuvent dégrader la linéarité. La réponse non linéaire du capteur CCD devrait être compensée dans les images aéroportées, pour éviter les difficultés dans la

calibration de la brillance des images vidéo par rapport aux classes assignées aux vérités terrains (King, 1992). Cependant, la courbe de réponse n'a pas été donnée par le fournisseur de la caméra. Il était donc nécessaire de réaliser la courbe de réponse du capteur CCD utilisé dans notre travail.

Le montage de la figure 7 montre le dispositif expérimental utilisé pour la calibration du capteur CCD de la caméra XYBION MSC-02. Grâce aux filtres neutres on varie l'intensité lumineuse transmise. Chaque filtre est caractérisé par sa densité optique qui est définie par la formule suivante:

$$D = \log_{10}(I_i/I_t) = \text{densité optique};$$

I_i = intensité lumineuse incidente (en niveau de gris);

I_t = intensité lumineuse transmise (en niveau de gris).

On en déduit la formule suivante: $10^{(-D)} = I_t/I_i$ qui exprime le rapport entre l'intensité lumineuse transmise et l'intensité lumineuse incidente.

À partir de quatre filtres neutres on essayera de construire d'autres combinaisons de filtres neutres pour chercher le maximum de points afin de réaliser la courbe de réponse du capteur CCD. En effet, à partir d'une intensité incidente I_i on veut obtenir une intensité inférieure I_t , si le filtre neutre correspondant n'est pas disponible. On pourra écrire alors:

$$\begin{aligned} D &= \log_{10}(I_i/I_t) = \log_{10}\{(I_i/I_{i1}) * (I_{i1}/I_t)\} \text{ avec } I_{i1} > I_t \\ &= \log_{10}(I_i/I_{i1}) + \log_{10}(I_{i1}/I_t) \\ &= D_1 + D_2. \end{aligned}$$

On conclut que la densité est additive lorsqu'on colle deux filtres neutres.

Le collimateur fait en sorte que les rayons lumineux émis par la source lumineuse soient parallèles entre eux suivant une direction horizontale pour traverser le filtre neutre et atteindre l'objectif du capteur CCD. Le micro-ordinateur 486 DX contient la carte électronique associé au logiciel "XICAS" pour le traitement du signal dont le menu est affiché sur le moniteur 1. L'image de la lampe, qui est transformée en un signal électrique au niveau du capteur CCD, est affichée sous forme d'une image vidéo sur le moniteur 2. Pour éviter des interférences avec d'autre rayonnement, l'expérience est réalisée dans une salle obscure. La partie de l'image analysée est une fenêtre de 24 pixels d'une zone presque uniforme au centre de l'image.

Le spectre de la lampe incandescente utilisée est suffisamment étendu pour couvrir les cinq bandes spectrales de la roulette de filtres en respectant la zone de sensibilité du capteur CCD (figure 9). Les résultats sont traduits par le tableau 1 et la figure 10.

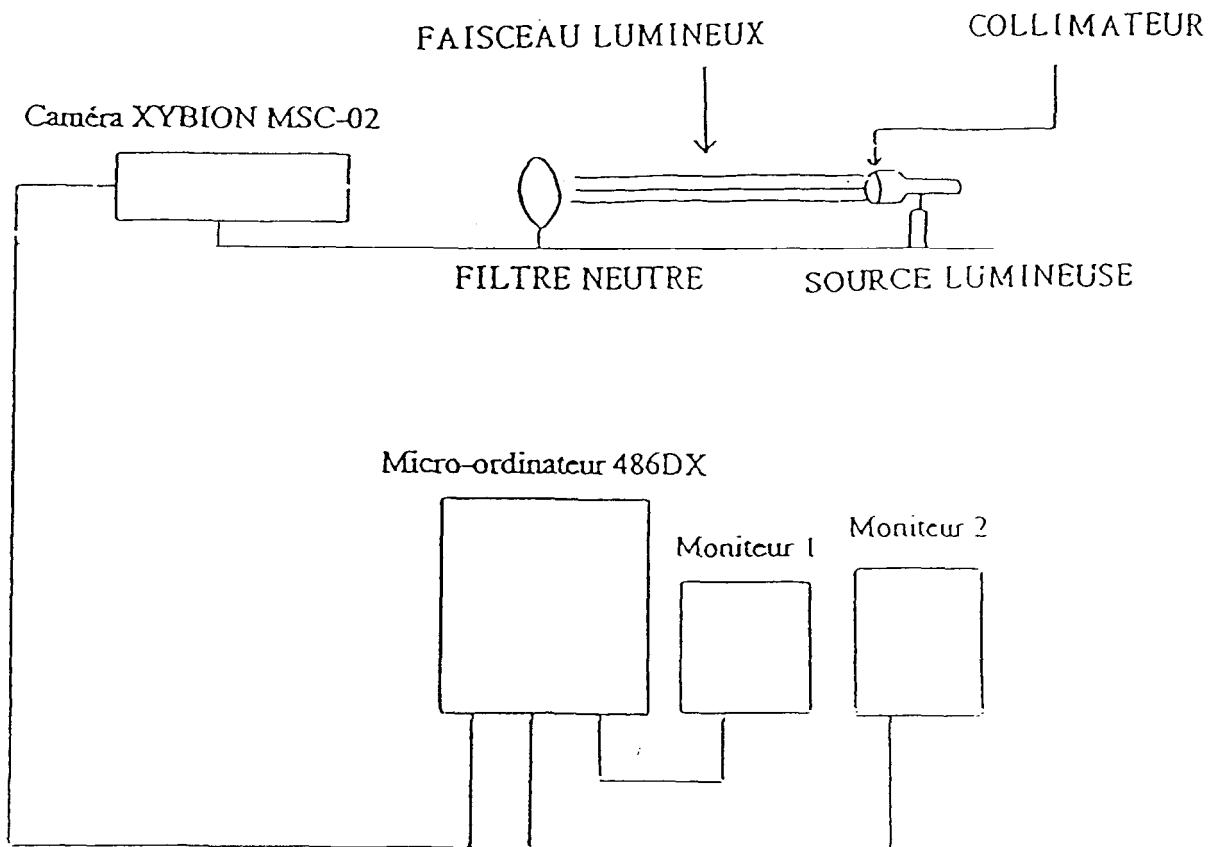


Figure 8. Schéma du dispositif expérimental de la calibration du capteur CCD

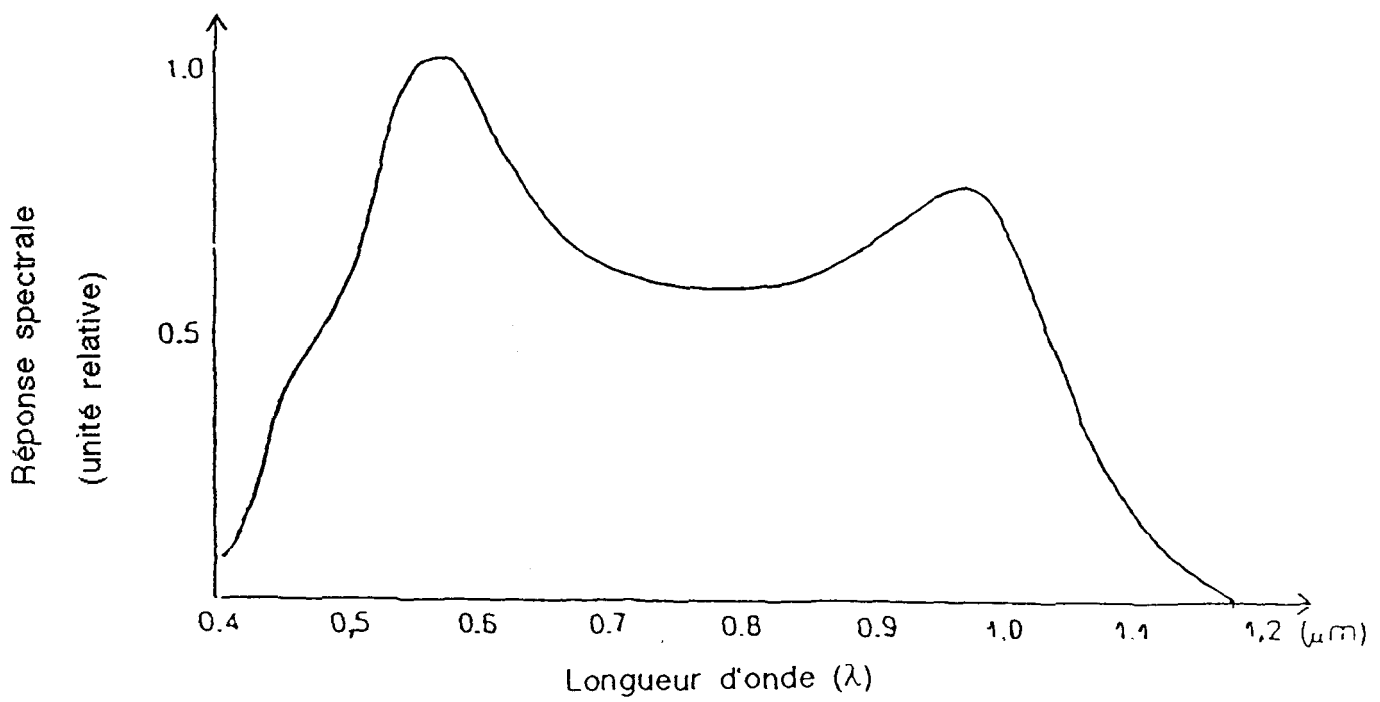


Figure 9. La réponse spectrale du capteur CCD du système vidéo

Tableau 1. La réponse du capteur CCD dans les cinq bandes spectrales. Pour chaque valeur de I_t/I_i (I_t =intensité transmise en ND (nombre digitaux); I_i =intensité incidente en ND), l'écart-type (σ) donne le degré d'uniformité de la radiométrie.

Longueur d'onde λ .	650 nm	800 nm	700 nm	725 nm	550 nm
I_t/I_i	intensité.	intensité.	intensité.	intensité.	intensité.
	écartype σ .	écartype σ .	écartype σ .	écartype σ .	écartype σ .
0,000	000	000	000	000	000
	000	000	000	000	000
0,032	053	018	001	000	000
	002	002	001	000	000
0,100	153	092	028	015	000
	001	003	002	001	000
0,158	200	142	060	037	004
	002	002	002	003	001
0,251	255	197	119	085	019
	000	001	002	003	002
0,398	255	237	155	123	037
	000	001	001	002	002
0,501	255	253	165	135	045
	000	001	002	002	004
0,794	255	255	222	189	096
	000	000	002	001	004
1,000	255	255	227	193	111
	000	000	001	001	003

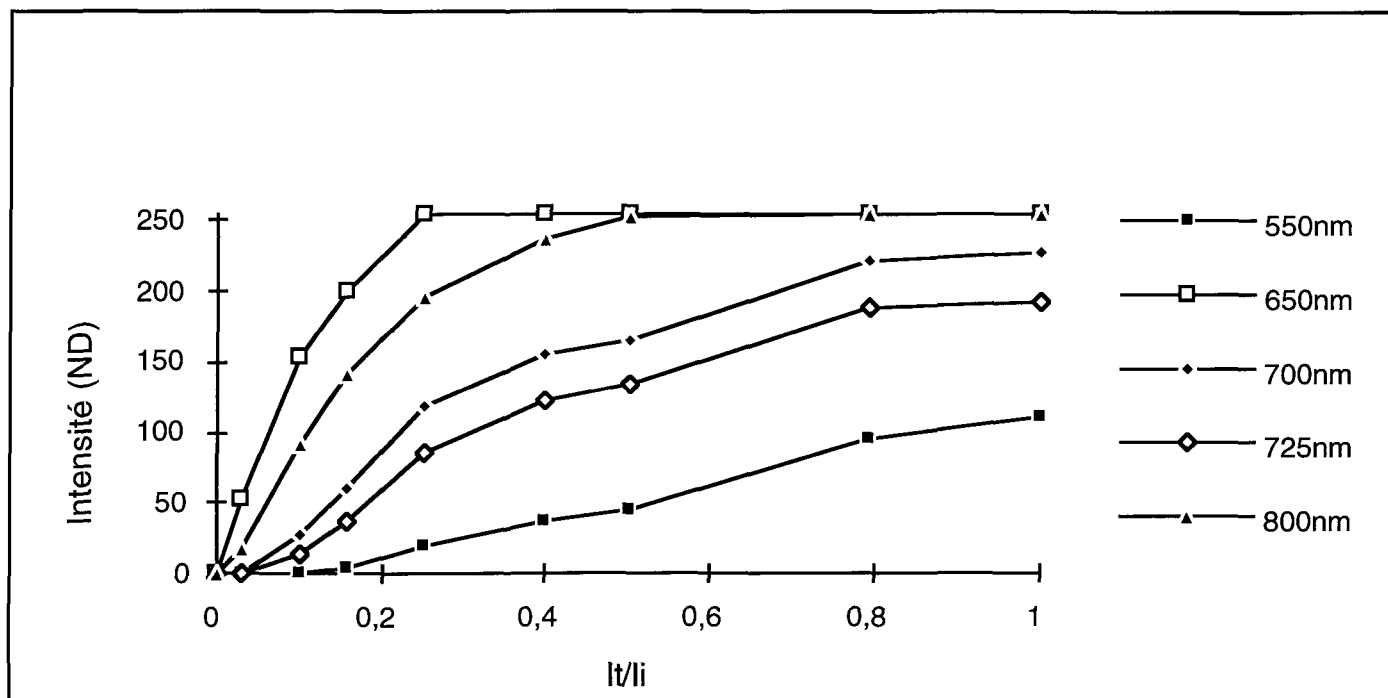


Figure 10. Réponse du capteur CCD dans les cinq bandes spectrales sur une échelle de niveaux de gris allant de 0 à 255 ND (nombre digitaux).

Compte tenu de l'émission spectrale de la source incohérente et de la bande passante des divers filtres, la saturation se fait sentir différemment d'une bande à l'autre.

La réponse du capteur dans le filtre 800 nm traduit bien la saturation précoce du capteur étant donné le nombre suffisant de points dont les ordonnées ne dépassant pas 255 niveaux de gris. C'est cette réponse qui sera utilisée dans la linéarisation des données et par suite la calibration du capteur, alors que les autres courbes sont, à un facteur multiplicatif près selon l'abscisse, égales à celle du filtre du 800 nm. Une courbe qui exprime une réponse linéaire du capteur serait une droite (D) qui passe par l'origine du repère et un point de la courbe 800nm, pour que les données soient proportionnelles. Le tableau 2 exprime les anciennes valeurs (Y_a) et les nouvelles valeurs (Y_n) de la radiométrie obtenues par l'équation de la droite (D):

$$Y_n = 785 * (I_v/I_j)$$

Une illustration de ces résultats est traduite par la figure 11.

Tableau 2. Linéarisation du capteur CCD: Y_a : la réponse du capteur CCD dans le filtre 800 nm en fonction de I_t/I_i . Y_n : les nouvelles valeurs radiométriques de la réponse du capteur CCD selon l'équation de la droite (D): $D(I_t/I_i) = 785 * (I_t/I_i)$.

I_t/I_i	Y_a	Y_n
0,000	000	000
0,032	018	025
0,100	092	079
0,158	142	124
0,251	197	197
0,398	237	312
0,501	253	393

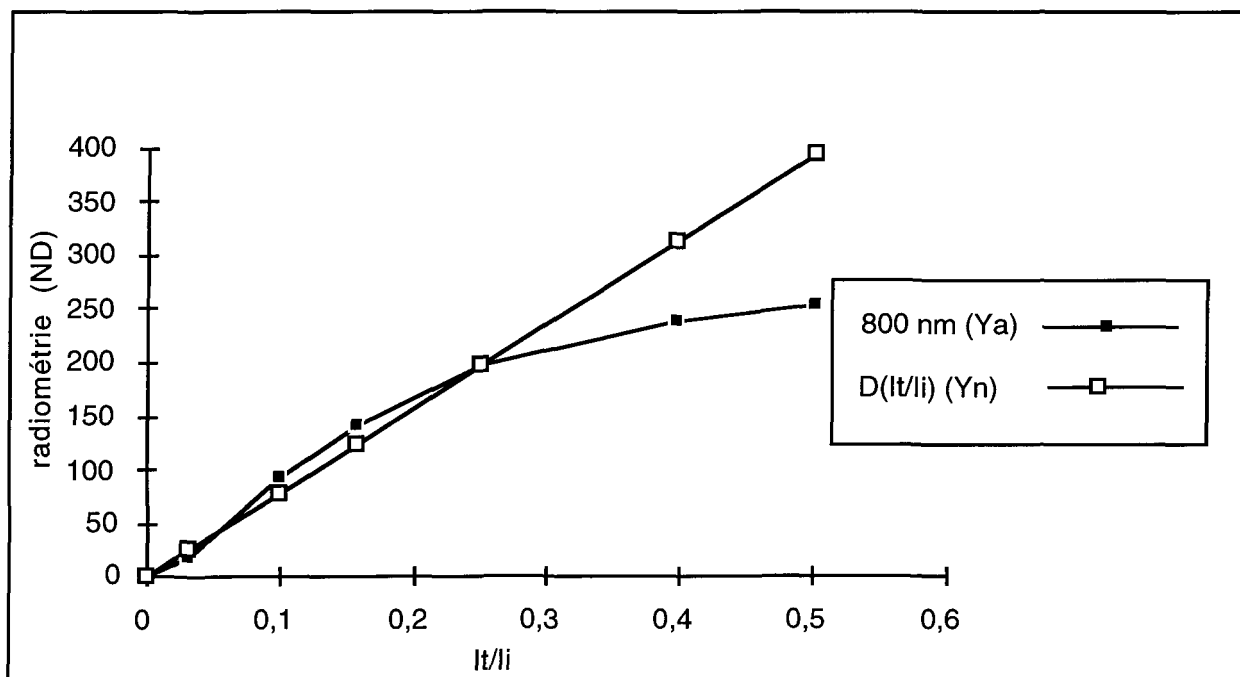


Figure 11. Linéarisation du capteur CCD MSC-02 de XYBION. Y_a (anciennes valeurs) : intensité mesurée dans le filtre 800 nm. Y_n (nouvelles valeurs) : intensité calculée pour le filtre 800 nm en niveau de gris (ND).

Ainsi à partir de l'équation de la droite (D): $Y_n = 785 * (I_t/I_i)$, on a retrouvé les nouvelles valeurs radiométriques (Y_n). Seules les valeurs de Y_a inférieures à 255 (nombre digitaux: ND) sont gardées car elles traduisent l'information correcte et utile pour déterminer la relation liant (Y_a) et (Y_n). Les valeurs de radiométrie égales à 255 niveaux de gris (ND) sont éliminées. Ces dernières correspondent à une information erronée parce que la valeur 255 (ND) est une limite que l'ordinateur donne à toute valeur qui lui est supérieure en stockant l'information en 8 bits. La calibration du capteur CCD est exprimée par la relation qui lie (Y_a) et (Y_n) respectivement les anciennes et les nouvelles valeurs radiométriques de la réponse du capteur. Cette relation est un polynôme au troisième degré avec un coefficient de corrélation $r^2 = 0,99$. L'équation de ce polynôme est :

$$Y_n = -1,42 + 1,77*Y_a - 0,01*Y_a^2 + 0,000052*Y_a^3$$

La calibration du capteur CCD est représentée par la figure 12.

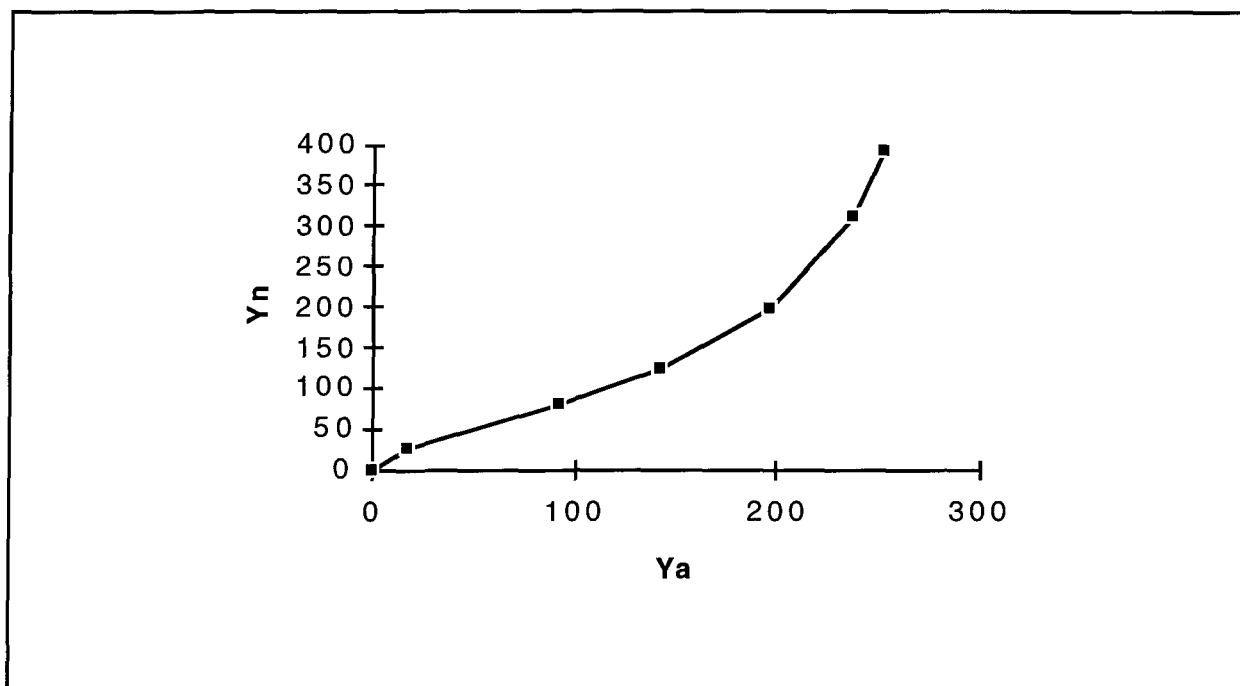


Figure 12. Calibration du capteur CCD. Y_a et Y_n en niveau de gris (ND).

III-6) Acquisition des données spectrales

III-6-a) Localisation des images de survol

La localisation des sites survolés sur l'enregistrement vidéo est très importante pour faire correspondre l'essence forestière dominante sur le terrain à son homologue survolé. À l'aide des coordonnées données par le GPS et la carte, on choisit les parcelles pour l'analyse multibande à l'aide du logiciel "XICAS".

Deux corrections s'avèrent nécessaires à apporter aux coordonnées de longitude et de latitude du centre de chaque image, exprimées en degrés, minutes et centièmes de minutes. Elles traitent:

- l'erreur sur les coordonnées données par le GPS par rapport aux coordonnées calculées sur la carte qui ont servi pour le pilotage de l'avion.

- l'intervalle de temps qui sépare deux changements successifs des coordonnées (longitudes et latitudes) données par le GPS. Ce décalage est probablement dû au retard causé par la détermination des nouvelles positions des satellites pour les calculs de triangulation donnant les nouvelles coordonnées du centre de l'image.

Les tableaux 3, 4 et 5 donnent les localisations résultantes des sites retenus.

Tableau 3. Les coordonnées en longitude et en latitude du centre des images des cites des peuplements à étudier (ligne de vol 1).

N ^o de peuplement	Type de peuplement	Longitude sur la carte	Latitude sur la carte	Ligne de vol
1872	Bétulaie à bouleau blanc	71°10,77'	40°40,29'	1
1877	Peupleraie (Tremble)	71°11,50'	48°40,01'	1
1882	Pin gris	71°11,88'	48°39,76'	1

Tableau 4. Les coordonnées en longitude et en latitude du centre des images des sites de peuplements à étudier (ligne de vol 2).

N ^o du peuplement	Type du peuplement	Longitude sur la carte	Latitude sur la carte	Ligne de vol
1907	Bétulaie à bouleau blanc	71°12,25'	48°40,29'	2
0192	Épinette noir	71°13,10'	48°41,17'	2

Tableau 5. Les coordonnées en longitude et en latitude du centre des images des sites de peuplements à étudier (ligne de vol 3).

N ^o du peuplement	Type du peuplement	Longitude sur la carte	Latitude sur la carte	Ligne de vol
1263	Sapinière	71°12,02'	48°41,12'	3
1925	Pin gris	71°12,44'	48°39,81'	3

III-6-b) Acquisition de la vérité-terrain

Les travaux de Williams (1991) du laboratoire de physique terrestre de la NASA sur la comparaison des propriétés de la réflectance spectrale des aiguilles, feuilles, branches et arbres chez certains conifères et feuillus ont été concluants. En effet la magnitude de la réflectance dans le proche infrarouge et le visible diminue chez les conifères lorsque la complexité de la scène augmente à partir des aiguilles, aux branches jusqu'à l'arbre. La comparaison des données de conifères avec leurs équivalents chez l'érable à sucre utilisé pour une validation quantitative montre qu'en générale les conifères sont plus absorbants que les feuillus particulièrement dans le proche infrarouge. Dans cette même région du spectre électromagnétique la réflectance et l'absorbance sont plus grands chez les aiguilles d'épinette de Norvège que les feuilles d'érable à sucre (Williams, 1991).

D'après le même auteur, un autre paramètre entre en jeu lorsqu'on passe des aiguilles ou feuilles aux petites branches (rameaux ou brindilles). Il s'agit de l'âge. En effet la réflectance des nouveaux rameaux et des anciens rameaux sont séparables chez les conifères contrairement au cas des feuillus. La diminution de la réflectance des rameaux lorsque l'âge augmente résulte probablement de l'augmentation de la rugosité de leurs surfaces particulièrement pour les conifères. Etant donné les caractéristiques de la symétrie de l'arborescence chez certains conifères et le pourcentage élevé des substances chimiques constituant le bois des tiges dans l'arbre, les rameaux peuvent jouer un rôle significatif dans la dispersion et l'absorption de la lumière à l'intérieur de

l'arbre (Williams, 1991). L'indice surfacique du feuillage (LAI) et la biomasse verte totale sont deux éléments intéressants à mesurer pour caractériser les propriétés de transfert radiatifs au niveau des branches. Ces mesures ont été acquises par le spectromètre SE-590 avec un champ de vision (FOV) de 15° en réalisant des empilements de 8 branches avec des séquences d'empilements allant de 8 à une seule branche et d'une seule à 8 branches. Les résultats obtenus par Williams (1991) montrent que la réflectance dans le proche infrarouge augmente lorsque le LAI augmente.

Pour l'acquisition des données spectrales des arbres ce dernier a utilisé, comme référence une caméra vidéo couleur montée dans un hélicoptère avec le spectromètre SE-590 et le radiomètre MMR dotés de lentilles ayant un champ de vision de 1° pour une comparaison quantitative. Les données spectrales montrent que pour les conifères il y a une diminution de la réflectance dans le proche infrarouge en allant des aiguilles aux branches jusqu'à l'arbre. Le même phénomène est observé dans le visible et particulièrement autour de 550 nm chez l'érable à sucre. La région d'absorption de la réflectance de la chlorophylle centrée à 680 nm apparaît comme un point d'inflexion des courbes de réflectance pour les conifères et les feuillus. Les changements des caractéristiques spectrales de la réflectance dans le proche infrarouge pour l'érable à sucre au niveau des feuilles et des branches sont différents de ceux trouvés pour les conifères. En effet, les résultats montrent qu'au niveau des branches, dans le proche infrarouge, la réflectance est plus grande qu'au niveau des feuilles. Ceci est attribuable au pourcentage élevé de la transmittance, conjointement avec les bas niveaux de l'absorption, de l'irradiance solaire dans

le proche infrarouge par les feuilles d'érable. Par conséquent un grand pourcentage de la lumière infrarouge pénètre à travers l'arbre et se réfléchit derrière ce dernier.

Le travail de Williams (1991) était limité à des mesures de réflectance au niveau des aiguilles, des branches et des arbres avec une haute résolution spectrale sans transformer ces données spectrales en des images numériques à traiter. On remarque, d'après des données spectrales tirées des courbes réalisées par ce dernier, qu'on peut faire correspondre les données spectrales des aiguilles ou feuilles, à celles des arbres prises à 300 m d'altitude par des rapports radiométriques de bandes spectrales. Ceci constitue notre deuxième objectif que nous devrions atteindre par le détecteur imageur VAM doté d'une résolution spectrale faible par rapport à celle du spectromètre SE-590.

Dans notre cas, les données à recueillir étaient les "signatures" spectrales des arbres matures, qui sont sujets d'analyse. Les données du terrain ont été acquises après le survol. En effet, nous avons été obligés de couper les arbres choisis qui se trouvaient sur l'enregistrement vidéo et de simuler une séquence de prise de vue verticale avec la même caméra multibande utilisée dans le survol en prenant un enregistrement de la "signature" spectrale de la tête de l'arbre. Cet arbre devait être reconnaissable sur l'image avec la plus grande précision possible. Ceci a été rendu possible à l'aide de la boussole et de la carte, à partir de repères facilement identifiables à la fois dans les images et sur la carte (intersections, rivages, etc.)

Coupées, les branches ont été mises en tas par terre pour réaliser des empilements égaux à ceux qu'on trouve dans l'arbre pour tenir compte de l'effet de la longueur d'onde. L'impossibilité d'éliminer l'effet de l'empilement observé uniquement dans le proche infrarouge nous a poussé à ce choix. Ces empilements de branches ont ensuite été photographiées par la même caméra multibande que celle utilisée pour le survol, donnant ainsi les "signatures" spectrales de références en simulant des prises de vue aériennes verticales. L'éclairage a été contrôlé de façon à avoir un signal mesurable et des images non saturées. Ce paramètre n'a pas été le même pour les quatre espèces forestières étudiées étant donnée que les conditions météorologiques n'étaient pas les mêmes lors de l'acquisition des "signatures" spectrales. Cependant ce même paramètre ainsi que les paramètres angulaires zénithaux définis entre le soleil, le capteur et la cible ainsi que l'altitude, ont des effets multiplicatifs sur la radiométrie brute (Vincent, 1984). Vincent, 1984 souligne l'importance de l'angle azimutal entre le soleil et le capteur sur la variation des réflectances dites bidirectionnelles car elles tiennent compte à la fois de la direction d'incidence et de la direction de réflexion. Lorsque le soleil est au zénith, le seul paramètre géométrique qui contribue dans les effets bidirectionnels est l'altitude. En effet la variation de cet angle lorsqu'on passe d'une altitude de 300m au sol est très faible. L'angle solide sous lequel le capteur voit un échantillon à partir d'une altitude "d" est inversement proportionnel à "d²", d'où l'importance de ce paramètre dans les effets bidirectionnels. L'élimination de ces effets par des rapports radiométriques de bandes spectrales fait partie de nos objectifs.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS

IV-1) Traitement numérique des données

IV-1-a) Traitement numérique des images de survol

Le déplacement de l'avion le long d'une ligne de vol entraîne un décalage entre les images lors de la capture d'une séquence d'images. Les images prises dans des bandes spectrales différentes sont décalées d'un certain nombre de pixels horizontalement et verticalement. Ceci reste vrai pour des images prises dans une même bande spectrale. Ainsi un pixel est vu dans plusieurs perspectives avec des valeurs radiométriques différentes. Ceci est dû à la variation aléatoire du bruit et à la position du pixel par rapport au centre de l'image. Un traitement préliminaire pour diminuer le bruit consiste à prendre la moyenne de trois images prises dans le même filtre et mises en registre pour compenser le déplacement de l'avion. Mettre en registre plus que trois images prises dans le même filtre entraîne un déplacement des inscriptions du GPS vers le centre de l'image ce qui limite la zone d'étude. Pour chercher la "signature" spectrale d'un arbre il faut mettre en registre les images moyennes des

différentes bandes spectrales. Le prélèvement de la "signature" spectrale d'un échantillon d'une image vidéo du survol est critique. En effet, la signification de chaque "signature" spectrale dépend du degré de justesse de la mise en registre qui est en relation avec le nombre de pixels représentatifs d'un arbre, lié directement à la résolution du capteur. La possibilité d'obtenir des images numériques d'une grande résolution spatiale à partir du détecteur aéroporté VAM a souvent été perçue comme une solution aux limitations de la télédétection. Une grande résolution spatiale permettant l'étude des parties d'un seul arbre rend invalide la plupart des méthodes d'analyse développées. Une approche partiellement numérique, combinant les avantages d'un travail sur "XICAS" avec la flexibilité d'une interprétation humaine assistée par ordinateur, est préconisée. L'uniformité des sites survolés, la magnitude de la réflectance dans le proche infrarouge et la précision des corrections apportées aux coordonnées de longitude et de latitude ont rendu facile la reconnaissance de l'espèce d'arbre sur une image vidéo. Pour chercher les branches dans toutes les directions, on a ouvert une fenêtre carrée de 16 pixels sur un feuillu et une autre de 12 pixels sur un conifère. La résolution de 70 cm/pixel nous a poussé à ce choix pour chercher les branches de deux arbres qui s'entrelacent, aussi bien que le pixel résultant de la réflexion d'une branche et de son environnement le plus proche. La "signature" spectrale d'un arbre est significative tant que l'histogramme des distributions des niveaux de gris est local et caractérisé par un écart-type très petit par rapport à la valeur moyenne de la radiométrie des pixels de l'échantillon en question. À l'état brut (*i.e* sans filtrage) l'histogramme de la distribution des niveaux de gris d'un échantillon est étalé avec un écart-type traduisant une "signature" spectrale non significative. Ceci est dû à la variation

aléatoire du bruit d'un pixel à un autre, la différence d'empilement d'un pixel à un autre et la position du pixel par rapport au centre de l'image. L'existence du vide entre les branches fait intervenir le bruit intrinsèque du capteur qui s'ajoute au bruit provenant de l'information acquise. Un filtrage adéquat était nécessaire pour diminuer le bruit. La dimension du filtre dépendait de la dimension de l'échantillon. En effet un filtre 3x3 convenait à la résolution du capteur. Ainsi le filtrage des échantillons par le filtre 3x3 donnant au pixel central la radiométrie moyenne des neuf pixels de la matrice, distribue le bruit dû au vide sur les pixels voisins. Ce même filtre diminue le bruit provenant de l'information acquise après des passages répétés (King et Jerry, 1990). Le filtre "médiane focale" est une matrice 3x3 donnant au pixel central la valeur radiométrique du pixel classé 5ième par ordre de niveau de gris parmi les neuf pixels de la matrice. Un premier passage de ce filtre éliminait les radiométries des pixels indésirables en compensant le vide (bruit) qui existe entre les branches et éliminait la différence d'empilement d'un pixel à l'autre s'elle existe. L'avantage de ce filtre est de diminuer le bruit provenant de l'information acquise (King et Jerry, 1990) et d'éliminer localement le bruit intrinsèque du capteur (le vide entre les branches). Ainsi l'histogramme de la distribution des niveaux de gris devient plus ou moins étroit et la population plus uniforme. Une façon fine pour plus uniformiser la population est de rétrécir la fenêtre d'un pixel de chaque côté pour éliminer l'effet de bord. Ensuite il faut passer le filtre en question deux ou trois fois pour obtenir une "signature" spectrale significative. Dans le cas des échantillons de survol, le rétrécissement de la fenêtre ramène l'information se trouvant dans l'environnement immédiat de l'échantillon au centre de la fenêtre jusqu'à l'obtention d'un nombre de pixels caractérisant un arbre. En général ce nombre

est de deux à quatre pixels dans le but de faciliter la fine discrimination envisagée entre les espèces forestières. Une comparaison sommaire entre la radiométrie de la moyenne radiométrique des pixels se trouvant dans la fenêtre finale et la moyenne de la radiométrie des pixels se trouvant dans la même fenêtre ouverte sur le même échantillon à l'état brut (*i.e* sans filtrage), montrera l'efficacité du filtre et de la méthode utilisée. En effet, les tableaux 6, 7, 8 et 9 englobent cette comparaison faite pour six arbres des quatre espèces étudiées respectivement entre les données avant traitement et après traitement. Dans chaque tableau, on notera la présence des valeurs radiométriques moyennes des pixels contenus dans la fenêtre finale représentant une espèce donnée dans différentes bandes spectrales accompagnées des écart-types. Ces valeurs radiométriques vérifient bien la "signature" spectrale citée par plusieurs auteurs (Suits, 1983 et Weber, 1971). Dans la majorité des cas, ces valeurs sont mesurables, sauf dans le filtre 700 nm où l'on note un faible signal. Ceci rend la radiométrie dans cette bande inséparable du bruit pour l'épinette noire et le pin gris. Le changement de la radiométrie après filtrage avec une diminution de l'écart-type chez les feuillus n'est pas brutal. En effet, la résolution de 70 cm/pixel semble être adéquate et le filtrage utilisé facilite l'extraction de leurs "signatures" spectrales. Cependant, pour les conifères, ce changement est brutal dans certains bandes spectrales et moindre dans d'autres. Ceci est probablement une des conséquences de la basse résolution spatiale du module de CCD utilisé dans l'acquisition des données spectrales. Cette résolution a beaucoup d'influence sur le taux de réussite de la mise en registre.

Tableau 6. Les valeurs radiométriques avant et après filtrage dans les cinq bandes spectrales pour le bouleau.

Échantillons	1	2	3	4	5	6
Bandes spectrales	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après
725 nm	059 - 062	071 - 063	047 - 051	068 - 058	060 - 055	053 - 053
Écart-type	005 - 000	000 - 000	002 - 000	008 - 000	006 - 000	002 - 002
800 nm	181 - 182	180 - 180	167 - 163	184 - 179	181 - 172	174 - 172
Écart-type	009 - 000	001 - 001	002 - 000	007 - 000	007 - 000	002 - 002
550 nm	102 - 098	112 - 100	098 - 087	095 - 086	095 - 092	092 - 098
Écart-type	003 - 000	004 - 003	016 - 000	025 - 000	006 - 000	011 - 000
650 nm	078 - 077	087 - 087	088 - 074	063 - 059	079 - 054	077 - 076
Écart-type	014 - 000	015 - 000	004 - 000	009 - 000	012 - 000	017 - 000
700 nm	029 - 025	039 - 019	027 - 023	019 - 013	023 - 016	027 - 020
Écart-type	003 - 000	002 - 000	005 - 001	006 - 000	008 - 000	005 - 000

Tableau 8. Les valeurs radiométriques avant et après filtrage dans les cinq bandes spectrales pour l'épinette noire.

Échantillons	1	2	3	4	5	6
Bandes spectrales	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après
725 nm	016 - 017	018 - 021	016 - 013	014 - 013	013 - 013	017 - 017
Écart-type	004 - 002	001 - 000	004 - 000	003 - 000	000 - 000	001 - 001
800 nm	074 - 073	087 - 070	088 - 083	109 - 093	090 - 083	083 - 074
Écart-type	008 - 001	004 - 003	003 - 000	004 - 003	002 - 000	005 - 001
550 nm	044 - 040	055 - 042	044 - 036	065 - 026	051 - 036	064 - 038
Écart-type	006 - 001	004 - 001	011 - 001	013 - 005	004 - 000	003 - 000
650 nm	028 - 027	039 - 034	025 - 022	034 - 020	029 - 023	042 - 026
Écart-type	004 - 003	004 - 005	008 - 003	021 - 002	008 - 000	011 - 000
700 nm	003 - 003	006 - 006	001 - 001	004 - 001	001 - 001	013 - 006
Écart-type	002 - 002	002 - 003	001 - 000	002 - 000	000 - 000	003 - 000

Tableau 9. Les valeurs radiométriques avant et après filtrage dans les cinq bandes spectrales pour le tremble.

Échantillons	1	2	3	4	5	6
Bandes spectrales	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après
725 nm	039 - 039	027 - 032	039 - 039	038 - 035	039 - 041	040 - 035
Écart-type	004 - 001	006 - 001	004 - 000	002 - 000	002 - 000	004 - 001
800 nm	151 - 149	138 - 157	143 - 146	159 - 152	153 - 158	151 - 154
Écart-type	003 - 000	013 - 002	007 - 001	008 - 000	007 - 000	008 - 002
550 nm	053 - 060	045 - 059	081 - 060	072 - 072	077 - 082	079 - 064
Écart-type	006 - 000	018 - 000	021 - 000	001 - 001	010 - 001	020 - 000
650 nm	043 - 044	027 - 038	057 - 044	049 - 049	049 - 050	062 - 049
Écart-type	004 - 000	012 - 001	014 - 000	000 - 000	002 - 000	012 - 000
700 nm	016 - 014	006 - 008	016 - 015	018 - 016	017 - 016	013 - 011
Écart-type	001 - 000	002 - 001	002 - 001	003 - 000	002 - 001	002 - 001

V-1-b) Traitement numérique des images de la vérité-terrain

Le traitement numérique des images vidéo de la vérité-terrain est semblable à celui des images du survol à quelques différences près. Chez les feuillus, la disposition aléatoire des feuilles dans l'arbre nous a poussé à spécifier notre échantillonnage. Ainsi, on a prélevé la "signature" spectrale de six feuilles dont trois d'entre elles vues du côté antérieur et trois autres vues du côté postérieur. Quant aux conifères étudiés, cette condition ne s'applique pas; on s'est contenté des "signatures" spectrales de six aiguilles pour chaque arbre. On ouvre une fenêtre d'une grandeur quelconque sur une feuille ou une aiguille (par exemple soixante à soixante-dix pixels) indépendamment de sa forme géométrique pour extraire une "signature" spectrale spécifique. Lors de l'affichage de l'histogramme de la distribution des niveaux de gris dans cette fenêtre, certaines saturations sont observées. Ces dernières représentent une fausse information. Ceci est dû à la différence d'empilement d'une région à l'autre de l'image pour une même espèce forestière. En outre, l'intensité du signal d'une espèce forestière à une autre n'est pas la même. La différence d'activité photosynthétique, d'ouverture du diaphragme et d'empilement des feuilles ou aiguilles sont les principales causes de ce phénomène. La "signature" spectrale cherchée sur une image vidéo est une moyenne radiométrique de la radiométrie de plusieurs pixels d'un échantillon donné. Les résultats montrent qu'à l'état brut (*i.e* sans filtrage), l'écart-type de la moyenne radiométrique des pixels représentant une espèce forestière est dans plusieurs cas, assez grand. Ceci s'explique par le fait que des pixels formant une partie d'une feuille (ou aiguille) peuvent provenir d'empilement différent (proche infrarouge). Par conséquent pour extraire une "signature" spectrale spécifique il

faut que les pixels contenus dans la fenêtre ouverte sur un échantillon proviennent d'un même empilement et contenant le minimum de bruit. Une façon de procéder est l'utilisation du filtre "médiane focale" 3x3 (King et Jerry, 1990). Le passage répété de ce filtre diminue considérablement l'écart-type éliminant ainsi les points de saturation provenant d'un fort empilement et/ou se trouvant au milieu de l'image. Le rétrécissement de la fenêtre suivi d'un passage répété du même filtre élimine l'effet de bord. Ce type de traitement rend la distribution locale des fréquences de niveaux de gris et fournit une "signature" spectrale spécifique à une espèce forestière. Les résultats montrant les valeurs radiométriques avant et après filtrage pour différentes aiguilles et feuilles sont colligés dans les tableaux 10, 11, 12, 13.

Tableau 10. Les valeurs radiométriques avant et après filtrage dans les cinq bandes spectrales pour différentes feuilles de bouleau.

Échantillons	1	2	3	4	5	6
	côté antérieur	côté antérieur	côté antérieur	côté postérieur	côté postérieur	côté postérieur
Bandes spectrales	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après
725 nm	138 - 138	135 - 136	134 - 136	111 - 111	112 - 112	111 - 110
Écart-type	005 - 000	003 - 000	003 - 000	004 - 000	004 - 001	004 - 001
800 nm	245 - 247	249 - 254	244 - 245	217 - 218	215 - 215	217 - 217
Écart-type	004 - 000	003 - 000	003 - 000	004 - 001	003 - 002	003 - 000
550 nm	183 - 179	182 - 183	172 - 173	127 - 127	132 - 132	123 - 124
Écart-type	006 - 001	003 - 000	008 - 001	007 - 001	007 - 001	006 - 001
650 nm	160 - 154	152 - 154	147 - 149	106 - 107	113 - 108	103 - 101
Écart-type	009 - 001	003 - 001	011 - 003	005 - 001	012 - 000	007 - 000
700 nm	076 - 074	074 - 072	066 - 068	042 - 042	047 - 045	039 - 039
Écart-type	006 - 001	006 - 000	008 - 001	005 - 001	006 - 001	005 - 001

Tableau 11. Les valeurs radiométriques avant et après filtrage dans les cinq bandes spectrales pour différentes aiguilles de pin gris.

Échantillons	1	2	3	4	5	6
Bandes spectrales	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après
725 nm	101 - 091	079 - 091	065 - 111	120 - 139	097 - 124	113 - 131
Écart-type	012 - 002	026 - 001	005 - 000	018 - 002	011 - 001	009 - 000
800 nm	217 - 210	173 - 215	176 - 232	242 - 245	216 - 241	229 - 244
Écart-type	010 - 002	022 - 000	004 - 001	013 - 004	016 - 002	009 - 001
550 nm	124 - 118	083 - 136	057 - 139	160 - 181	124 - 187	145 - 202
Écart-type	025 - 000	045 - 001	014 - 004	047 - 002	033 - 000	032 - 001
650 nm	097 - 096	081 - 115	060 - 121	141 - 148	134 - 150	126 - 169
Écart-type	020 - 001	026 - 000	009 - 002	044 - 000	055 - 000	029 - 002
700 nm	035 - 027	024 - 035	007 - 041	060 - 075	055 - 082	064 - 079
Écart-type	011 - 000	018 - 000	004 - 003	030 - 001	030 - 000	033 - 001

Tableau 12. Les valeurs radiométriques avant et après filtrage dans les cinq bandes spectrales pour différentes aiguilles d'épinette noire.

Échantillons	1	2	3	4	5	6
Bandes spectrales	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après
725 nm	139 - 124	137 - 133	133 - 135	147 - 147	135 - 136	142 - 141
Écart-type	002 - 001	005 - 002	005 - 001	003 - 000	007 - 001	006 - 001
800 nm	246 - 230	236 - 237	239 - 239	251 - 251	240 - 242	245 - 245
Écart-type	003 - 001	008 - 000	005 - 001	004 - 000	007 - 001	004 - 000
550 nm	253 - 236	243 - 243	240 - 238	246 - 250	244 - 247	251 - 248
Écart-type	003 - 000	010 - 001	009 - 000	005 - 002	017 - 002	010 - 000
650 nm	240 - 216	232 - 230	220 - 231	231 - 236	235 - 240	247 - 250
Écart-type	005 - 001	021 - 000	025 - 003	009 - 001	024 - 000	014 - 001
700 nm	118 - 100	109 - 108	111 - 114	123 - 125	119 - 120	145 - 138
Écart-type	005 - 000	013 - 002	014 - 002	007 - 001	020 - 002	009 - 001

Tableau 13. Les valeurs radiométriques avant et après filtrage dans les cinq bandes spectrales pour différentes feuilles de tremble.

Échantillons	1	2	3	4	5	6
	côté antérieur	côté antérieur	côté postérieur	côté postérieur	côté postérieur	côté antérieur
Bandes spectrales	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après	Avant - Après
725 nm	040 - 040	030 - 031	026 - 027	017 - 018	028 - 028	035 - 033
Écart-type	004 - 000	003 - 001	003 - 000	003 - 000	004 - 000	004 - 000
800 nm	133 - 133	127 - 128	121 - 122	090 - 091	118 - 118	134 - 133
Écart-type	004 - 000	003 - 000	003 - 000	003 - 001	004 - 001	002 - 000
550 nm	129 - 127	147 - 148	101 - 103	066 - 066	125 - 121	145 - 145
Écart-type	007 - 003	003 - 001	004 - 002	004 - 001	005 - 002	003 - 001
650 nm	101 - 100	126 - 127	073 - 072	047 - 046	103 - 096	127 - 127
Écart-type	008 - 003	002 - 001	004 - 001	005 - 001	010 - 002	004 - 001
700 nm	021 - 020	029 - 029	018 - 018	008 - 006	033 - 030	029 - 029
Écart-type	005 - 002	003 - 000	003 - 001	004 - 000	004 - 002	006 - 001

IV-2) Les rapports des radiométries des bandes spectrales

IV-2-1) Correction des données spectrales par la fonction de calibration

Avant d'amorcer les rapports de la radiométrie des bandes spectrales, il faut corriger les données spectrales de chaque espèce forestière. Les données spectrales du survol et celles de la vérité-terrain, filtrées par le filtre "médiane focale", sont corrigées par la même fonction de linéarisation établie lors de la calibration du capteur CCD. Il s'agit de la fonction :

$$Y_n = -1,42 + 1,77*Y_a - 0,01*Y_a^2 + 0,000052*Y_a^3$$

Les résultats de cette transformation sont illustrés par les tableaux 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21.

IV-2-2) Les rapports des radiométries des bandes spectrales

IV-2-a) Approximations

Les processus d'absorption par les gaz atmosphériques et de diffusion par les aérosols et les molécules perturbent les mesures de réflectance des surfaces terrestres faites à partir de satellites. La perturbation apportée par l'atmosphère peut être modélisée en considérant cette dernière comme un milieu optique d'épaisseur " Δ ". Lorsque les bandes spectrales sont bien choisies dans des fenêtres atmosphériques transparentes on peut généralement négliger l'absorption par les gaz et ne tenir compte que de la diffusion par les aérosols (Deschamps *et al.* 1981). La diffusion atmosphérique provoque un mélange des "signatures" spectrales de cibles voisines. Dans le présent travail, le choix des bandes spectrales est fait dans les fenêtres atmosphériques d'où un effet d'absorption atmosphérique négligeable.

Tableau 14. Les radiométries corrigées par la fonction de calibration pour le bouleau.

Bandes spectrales	725 nm	800 nm	550 nm	650 nm	700 nm
Échantillons					
1	082	303	125	099	037
2	083	296	128	111	029
3	070	247	111	096	030
4	078	293	110	079	020
5	074	272	117	073	025
6	072	272	125	098	030

Tableau 15. Les radiométries corrigées par la fonction de calibration pour le pin gris.

Bandes spectrales	725 nm	800 nm	550 nm	650 nm	700 nm
Échantillons					
1	017	110	057	043	004
2	020	128	055	043	004
3	022	129	067	053	007
4	022	117	062	051	009
5	018	120	059	048	006
6	025	122	073	062	011

Tableau 16. Les radiométries corrigées par la fonction de calibration pour l'épINETTE noire.

Bandes spectrales	725 nm	800 nm	550 nm	650 nm	700 nm
Échantillons					
1	029	128	069	046	004
2	036	122	073	059	009
3	022	145	059	038	000
4	022	163	045	034	000
5	022	146	062	039	000
6	029	130	066	045	009

Tableau 17. Les radiométries corrigées par la fonction de calibration pour le tremble.

Bandes spectrales	725nm	800nm	550nm	650nm	700nm
Échantillons					
1	055	212	080	062	022
2	047	231	079	054	012
3	055	206	080	062	023
4	035	152	072	049	016
5	041	158	082	050	016
6	035	154	064	049	011

Tableau 18. Les radiométries corrigées par la fonction de calibration pour les feuilles de bouleau.

Bandes spectrales	725 nm	800 nm	550 nm	650 nm	700 nm
Échantillons					
1	189	609	293	224	096
2	185	655	306	224	094
3	185	597	275	212	089
4	143	448	169	137	059
5	144	434	178	139	063
6	141	443	163	129	055

Tableau 19. Les radiométries corrigées par la fonction de calibration pour les aiguilles de pin gris.

Bandes spectrales	725nm	800nm	550nm	650nm	700nm
Échantillons					
1	116	411	154	122	040
2	116	434	185	149	051
3	143	520	191	158	058
4	191	597	300	210	097
5	163	572	320	215	105
6	176	590	377	263	102

Tableau 20. Les radiométries corrigées par la fonction de calibration pour les aiguilles d'épinette noire.

Bandes spectrales	725 nm	800 nm	550 nm	650 nm	700 nm
Échantillons					
1	218	406	416	381	176
2	234	418	429	406	190
3	238	422	420	407	200
4	259	443	441	416	220
5	239	427	436	423	211
6	248	432	438	441	243

Tableau 21. Les radiométries corrigées par la fonction de calibration pour les feuilles de tremble.

Bandes spectrales	725 nm	800 nm	550 nm	650 nm	700 nm
Échantillons					
1	056	179	169	128	030
2	045	170	210	169	043
3	040	160	132	094	028
4	028	116	087	064	009
5	041	154	158	122	044
6	048	179	204	169	043

En outre, l'uniformité des sites survolés, la basse altitude et la haute résolution spatiale laissent la faible diffusion par un milieu optique mince mélanger les rayons lumineux provenant de la même espèce et de la même cible. Une deuxième approximation est à signaler, il s'agit de négliger le courant noir. Il est évalué à 1,15 niveau de gris (ND) en fermant l'objectif de la caméra et en calculant la radiométrie moyenne d'une image presque noire.

IV-2-2-b) Les rapports radiométriques de bandes spectrales

La réflectance d'une cible est le rapport spectral de l'intensité du signal réfléchi " S_r " sur l'intensité du signal incident " S_j ", d'où l'importance de la transformation de " S_r " en mesure de réflectance que plusieurs auteurs suggèrent (Suits, 1983 et Weber, 1971). Dans le cas des rapports radiométriques cette transformation n'est pas obligatoire puisque les conditions d'éclairement sont les mêmes pour tout les peuplements forestiers étudiés. Les mesures de réflectance RA_i et RA_j d'une cible "A", dans deux bandes spectrales B_i et B_j , sont obtenues à partir de " S_{ri} ", " S_{rj} ", " S_{ii} " et " S_{ij} ". En effet, $RA_i = S_{ri}/S_{ii}$ et $RA_j = S_{rj}/S_{ij}$. Donc le rapport $RA_i/RA_j = (S_{ri}/S_{rj}) * (S_{ij}/S_{ii})$ où S_{ij}/S_{ii} est une constante caractéristique des propriétés spectrales de la source d'éclaircements, *i.e.* du soleil, mais indépendante des divers échantillons qui sont investigués sous les mêmes conditions d'éclaircements. Ainsi S_{ri}/S_{rj} est proportionnel à RA_i/RA_j . Les rapports de radiométrie ont donc la même sensibilité que les rapports de réflectance pour discriminer différentes espèces ou pour comparer survol et vérité-terrain. Notons qu'à cause du faible signal dans certaines bandes spectrales (bruit), on a éliminé certains rapports comme dans le cas de l'épinette noire et du pin gris dans la bande 700 nm. Pour les quatre espèces forestières, on a conservé seulement les rapports radiométriques de bande spectrales significatifs. Il s'agit de la

significatifs. Il s'agit de la moyenne de six rapports radiométriques de six échantillons d'une même espèce forestière qui vérifient l'hypothèse de départ. Ceci est illustré dans les sections IV-3 et IV-4 consacrées à l'analyse des résultats qui sont colligés dans les tableaux 22 et 23.

Chaque rapport représente une fraction de réponse spectrale. Un facteur d'échelle adéquat et commun à tous les rapports est nécessaire si on visualise directement les images rapports sur l'écran cathodique avec une représentation numérique à 8 bits. Le résultat peut dépasser les 8 bits si les algorithmes proposés sont indépendants de la représentation d'une image en ton de gris. En effet, ces rapports sont stockés sous forme d'information numérique prêtes à être utilisées dans une classification où chaque classe est représentée par un niveau de gris inférieur à 8 bits. Pour tous les rapports réalisés, le facteur d'échelle était de "50". Ce choix est arbitraire, un autre opérateur pourrait choisir un autre facteur.

IV-2-2-b-1) Les rapports radiométriques deux à deux des bandes spectrales

Les rapports radiométriques deux à deux des bandes spectrales, sont définis comme étant le rapport de la radiométrie R_i dans la bande B_i sur la radiométrie R_j dans la bande B_j , d'un pixel $M(x, y)$:

$$Q_{ij} = \text{facteur d'échelle} * (R_i/R_j).$$

La normalisation par les rapports radiométriques avec un même facteur d'échelle donne des résultats sur une nouvelle échelle. La nécessité du facteur d'échelle dépend des alternatives (citées au paragraphe précédent) à prendre par l'opérateur.

IV-2-2-b-2) Les rapports des rapports normalisés

Il faut noter que le critère de rugosité dépend de la longueur d'onde (Becker *et al.*, 1978). Ainsi, une surface pourra être considérée comme plane pour les micro-ondes même si elle est très rugueuse dans le visible (Becker *et al.*, 1978). Selon le même auteur, si le milieu est dispersif, la réflectivité dépend de la longueur d'onde λ , d'où l'intérêt des analyses spectrales. Par conséquent, les effets bidirectionnels peuvent ne pas être comparables d'une longueur d'onde à une autre dans certains cas. Ceci est dû à la différence de rugosité entre l'arbre vu à 300 m d'altitude et les feuilles (aiguilles) sur le terrain. Cette propriété optique reste valable lorsqu'il s'agit de deux espèces forestières différentes. Par conséquent, les erreurs systématiques géométriques indépendantes de la longueur d'onde s'éliminent par les simples rapports radiométriques des bandes spectrales deux à deux. Quant aux erreurs multiplicatives qui dépendent de la longueur d'onde λ , elles ont des chances d'être éliminées dans certains rapports des rapports normalisés et dans d'autre peuvent être amplifiés. Les variations de la radiométrie dues aux erreurs systématiques multiplicatives qui affectent les images brutes du système VAM lorsqu'on passe du sol à une altitude de 300 m, peuvent être décrites par une seule fonction $f(d\Omega, \lambda)$. Cette fonction peut être le produit de deux fonctions $g(d\Omega)$ (qui définit le paramètre géométrique) et $h(\lambda)$ (le

facteur angulaire dû à la longueur d'onde), où $d\Omega$ et λ sont respectivement l'angle solide du capteur et la longueur d'onde. En effet, $f(d\Omega, \lambda) = g(d\Omega) \times h(\lambda)$. Les rapports des rapports normalisés éliminent ou amplifient le facteur $h(\lambda)$ puisque le facteur $g(d\Omega)$ est supposé être éliminé par les simples rapports radiométriques. Toutefois, l'augmentation de l'erreur induite par les systèmes de mesure (sous forme de bruit), en utilisant cet algorithme n'est pas significative. En effet la basse altitude, les fenêtres atmosphériques, le faible courant noir et le traitement numérique utilisé justifie l'approximation faite.

On définira les rapports normalisés suivants:

$$Q_1 = Q_{725\text{nm},800\text{nm}} = R_{725\text{nm}}/R_{800\text{nm}},$$

$$Q_2 = Q_{550\text{nm},650\text{nm}} = R_{550\text{nm}}/R_{650\text{nm}},$$

$$Q_3 = Q_{800\text{nm},650\text{nm}} = R_{800\text{nm}}/R_{650\text{nm}},$$

$$Q_4 = Q_{650\text{nm},725\text{nm}} = R_{650\text{nm}}/R_{725\text{nm}},$$

$$Q_5 = Q_{550\text{nm},800\text{nm}} = R_{550\text{nm}}/R_{800\text{nm}},$$

$$Q_6 = Q_{725\text{nm},550\text{nm}} = R_{725\text{nm}}/R_{550\text{nm}}.$$

IV-2-2-b-3) Les rapports de deux bandes moyennes

L'algorithme qui consiste à diviser la radiométrie d'une bande spectrale par la somme des autres bandes ($R_i/\sum R_j$) (Bonn, *et al.* 1992), pourra être exprimé d'une autre manière. Soient R_1 , R_2 , R_3 et R_4 les radiométries brutes d'un échantillon quelconque dans quatre bandes spectrales, B_1 , B_2 , B_3 et B_4 . Supposons que l'on réalise les moyennes suivantes:

$$BM_1 = (R_1 + R_2)/2 \quad (1);$$

$$BM_2 = (R_3 + R_4)/2 \quad (2).$$

Si on divise (1) sur (2) on obtient :

$$(R_1 + R_2)/(R_3 + R_4),$$

on trouve alors un résultat similaire à celui cité par Bonn *et al.* . Il s'agit d'une construction de nouvelles composantes à partir des anciens vecteurs B_1 , B_2 , B_3 et B_4 avec les coefficients R_1 , R_2 , R_3 et R_4 . La matrice de correspondance entre les données de la vérité-terrain et les données de survol devrait être diagonale dans ce nouveau système de base si la construction de ce système est adéquate.

Sachant que:

$$BM_1 = \text{moyenne (725nm,800nm)},$$

$$BM_2 = \text{moyenne (550nm,650nm)},$$

$$BM_3 = \text{moyenne (650nm,700nm)},$$

$$BM_4 = \text{moyenne (725nm,700nm)},$$

le nombre de combinaison possible pour réaliser des bandes moyennes deux à deux parmi 5 bandes spectrales est 10. Quatre possibilités sont suffisantes, puisqu'il s'agit de distribuer les bandes spectrales entre le numérateur et le dénominateur, et non pas de réaliser toutes les combinaisons possibles qui entraîneront une répétition de l'information contenue dans les cinq bandes spectrales.

IV-3) La correspondance entre les rapports de la vérité-terrain et ceux du survol

C'est l'étape qui permettra de sélectionner les rapports décisifs dans la discrimination des espèces forestières. La correspondance entre les données de la vérité-terrain et celles du survol est basée sur le test statistique d'égalité entre deux moyennes de deux populations de nombre d'individus inférieur à 30. Soit la moyenne des rapports radiométriques de bandes spectrales relatifs à la vérité-terrain et celle du survol, avec leur écart-type respectif σ_1 et σ_2 . L'hypothèse de départ est " $\mu_1=\mu_2$ ", autrement dit, on doit chercher les cas où l'hypothèse nulle " $\mu_1-\mu_2=0$ " n'est pas rejetable au seuil $\alpha=5\%$. En pratique, cette hypothèse n'est pas rejetable tant que les deux moyennes μ_1 et μ_2 se joignent par les écart-types σ_1 et σ_2 . Les rapports qui réalisent cette condition pour les quatre espèces forestières étudiées sont données dans le tableaux 22.

Tableau 22. La correspondance entre les données du survol et celles de la vérité-terrain.

Espèce forestière		Rapport	Moyenne	Ecart-type
Bouleau	Vérité-terrain	R _{725 nm} /R _{650 nm}	048	06
	Survol		042	06
Bouleau	Vérité-terrain	R _{800 nm} /R _{650 nm}	152	14
	Survol		155	26
Bouleau	Vérité-terrain	R _{550 nm} /R _{650 nm}	065	02
	Survol		065	09
Bouleau	Vérité-terrain	R _{725 nm} /R _{550 nm}	037	06
	Survol		032	02

Tableau 22 (suite).

Espèce forestière		Rapport	Moyenne	Ecart-type
Bouleau	Vérité-terrain	BM ₁ /BM ₂	087	10
	Survol		085	09
Bouleau	Vérité-terrain	BM ₁ /BM ₃	140	13
	Survol		150	26
Bouleau	Vérité-terrain	BM ₂ /BM ₃	080	02
	Survol		088	07
Bouleau	Vérité-terrain	BM ₃ /BM ₄	052	04
	Survol		058	06

Tableau 22 (suite).

Espèce forestière		Rapport	Moyenne	Ecart-type
Pin gris	Vérité-terrain	R _{800 nm} /R _{650 nm}	144	21
	Survol		123	16
Pin gris	Vérité-terrain	R _{550 nm} /R _{650 nm}	067	06
	Survol		063	03
Pin gris	Vérité-terrain	R _{800 nm} /R _{550 nm}	109	24
	Survol		098	10
Pin gris	Vérité-terrain	BM ₁ /BM ₂	080	14
	Survol		064	07

Tableau 22 (suite).

Espèce forestière		Rapport	Moyenne	Ecart-type
Bouleau	Vérité-terrain	R800nm/R500nm	118	14
	Survol		118	09
Tremble	Vérité-terrain	R550nm/R650nm	65	04
	Survol		71	07
Tremble	Vérité-terrain	R700nm/R650nm	013	04
	Survol		015	03
Epinette noire	Vérité-terrain	R725 nm/R650 nm	029	01
	Survol		030	02

Tableau 22 (suite).

Espèce forestière		Rapport	Moyenne	Ecart-type
Tremble	Vérité-terrain	R700 nm/R550 nm	010	03
	Survol		011	03
Tremble	Vérité-terrain	R725 nm/R800 nm	013	01
	Survol		012	01
Tremble	Vérité-terrain	R700 nm/R800 nm	010	04
	Survol		005	01
Tremble	Vérité-terrain	BM ₁ /BM ₄	140	30
	Survol		190	26
Tremble	Vérité-terrain	BM ₂ /BM ₃	107	20
	Survol		093	07

IV-4) La discrimination des espèces forestières

La discrimination des espèces forestières étudiées se fait à partir des rapports radiométriques de bandes spectrales qui vérifient l'hypothèse nulle " $\mu_1 - \mu_2 = 0$ " utilisée dans la correspondance entre les données de la vérité-terrain et celles du survol. Cependant, pour deux espèces forestières différentes A et B, on tranchera sur la validité d'un rapport discriminant s'il vérifie l'hypothèse non nulle " $\mu_A - \mu_B \neq 0$ ", sachant que μ_A est la moyenne des rapports des échantillons de l'espèce A et μ_B est celle de l'espèce forestière B. Autrement dit, pour chaque espèce A et B, un rapport est discriminant si les deux moyennes μ_A et μ_B ne se joignent pas par leurs écart-types respectifs σ_A et σ_B . Les rapports relatifs aux données de la vérité-terrain sont plus subtils et plus significatifs dans la reconnaissance d'une espèce donnée ou dans une classification dirigée. Par conséquent, c'est sur ces rapports qu'on doit se baser pour identifier les essences forestières étudiées. Les rapports radiométriques de bandes spectrales discriminants sont colligés au tableau 23.

D'après ces résultats, la méthode des rapports des rapports normalisés des radiométries de bandes spectrales vient s'ajouter aux autres méthodes utilisées pour éliminer les effets multiplicatifs cités par plusieurs auteurs (Bonn *et al.* 1992, Vincent 1984 et Crane, 1971), en l'occurrence, les rapports radiométriques deux à deux des bandes spectrales et les rapports radiométriques d'une bande spectrale sur la somme des radiométries des autres bandes spectrales.

Tableau 23. Discrimination des espèces forestières étudiées par les rapports radiométriques de bandes spectrales.

Discrimination	Rapport	Moyenne	Ecart-type
Bouleau	$R_{725 \text{ nm}}/R_{650 \text{ nm}}$	048	06
Epinette noire		029	01
Bouleau	BM_2/BM_3	080	02
Tremble		107	20

La dépendance entre la disposition des feuilles chez les feuillus et les rapports radiométriques est sentie dans certains rapports radiométriques de bandes spectrales. D'où l'importance de cette disposition dans le choix de la "signature" spectrale lors de l'acquisition de la vérité-terrain, étant donné la disposition aléatoire des feuilles dans l'arbre. Certains rapports radiométriques sont les mêmes pour deux espèces forestières différentes, étant donné la ressemblance des formes des "signatures" spectrales des végétaux. D'où l'inconvénient de la méthode du calcul du pourcentage de la radiométrie d'une bande spectrale par rapport à celle d'une autre bande spectrale. Dans les couples suivants (725nm; 650nm), (800nm; 550nm), (550nm; 650nm) (725nm; 650nm) et (800nm; 650nm) on peut alors considérer le bouleau comme une surface plane lorsqu'on passe du sol à une altitude de 300m. Toutefois l'effet de la longueur d'onde observé chez les autres espèces forestières nous oblige d'utiliser les rapports des rapports normalisés pour raffiner la discrimination des essences forestières. Certains de ces rapports ont éliminé l'effet de la longueur d'onde en donnant le même pourcentage chez deux espèces forestières différentes et d'autres rapports ont amplifié cet effet. Le comportement du pin gris comme une surface plane est observé entre les bandes spectrales suivantes: (800nm; 650nm), (550nm, 650nm), (800nm; 550nm). Le même comportement est observé chez l'épinette noire entre les deux bandes 725nm et 650nm. Pour le tremble cette même propriété est observée entre les bandes spectrales suivantes : (550nm; 650nm), (700nm; 650nm), (700nm; 550nm), (725nm; 800nm), (700nm; 800nm). Une discrimination entre le bouleau et le tremble est vue dans la nouvelle composante BM_2/BM_3 obtenue à partir d'une combinaison linéaire des bandes

spectrales : 550nm, 650nm et 700nm. Une nette discrimination entre le bouleau, et l'épinette noire est obtenue par le rapport R_{725nm}/R_{650nm} .

CHAPITRE V

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

V-1) La situation

Les rapports radiométriques du survol qui sont en coïncidence avec la vérité-terrain pour une espèce ne le sont pas toujours pour une autre espèce, ce qui s'explique par le fait que les effets multiplicatifs sont en liaison avec les conditions d'illumination, la topographie de la cible visée, la vitesse et la direction du vent (Vincent, 1984). Ces effets lient étroitement les rapports radiométriques de bandes spectrales à la disposition aléatoire des feuilles dans l'arbre. Certains rapports, à cause du faible signal de la radiométrie des bandes spectrales mis en jeu, ont été éliminés, d'où d'autres opportunités en moins. La résolution spatiale qui ne convient pas pour certaines espèces lors du filtrage, rend difficile cette fine discrimination. Une des conséquences de ces faits, c'est l'absence de certaines discriminations à l'aide de ces rapports, alors qu'elles sont évidentes avec la radiométrie brute. Notons qu'on a réalisé une nette discrimination entre le bouleau et l'épinette noire dans le rapport R_{725nm}/R_{650nm} et entre le bouleau et le tremble dans le rapport BM_2/BM_3 .

V-2) Les limites de la méthode

Dans notre expérience le choix des filtres est critique. En effet, dans l'intervalle de longueurs d'onde [700nm, 750nm] où la montée de la réflectance d'un végétal est brutale, il est difficile de se fier à la qualité du signal et d'aller chercher des bandes spectrales étroites à ± 5 nm. Ce choix est conditionné par un triage des bandes spectrales étroites avec le minimum de covariance entre ces bandes.

Dans certains cas la ressemblance des signatures spectrales des végétaux donne des rapports radiométriques identiques pour deux espèces forestières différentes. D'où l'importance de la radiométrie brute comme un guide de la reconnaissance des objets.

La mise en registre est difficile dans le cas des espèces forestières qui sont représentées par un ou deux pixels, comme c'est le cas pour l'épinette noire. Cette difficulté est plus explicite en particulier lors de la mise en registre de trois images consécutives du même filtre pour diminuer le bruit. En effet, l'identification du bout d'un objet dans l'image à mettre en registre est difficile puisque les fluctuations de la radiométrie font en sorte que le bout de cet objet qui correspond à un seul pixel brillant dans la première image peut se retrouver sur plusieurs pixels moins brillants dans l'autre image. Tout défaut dans la mise en registre entraînera une fausse "signature" spectrale. Par conséquent, des rapports radiométriques de bandes spectrales seront non significatifs, pour les bandes spectrales qui sont mal mises en registre. Ceci diminue la contribution

de la radiométrie des pixels représentant un arbre dans la moyenne radiométrique des pixels contenus dans la fenêtre à filtrer pour en extraire une "signature" spectrale. D'où un nombre limité de rapports qui vérifient notre hypothèse dans le cas de l'épinette noire. La résolution de 70 cm reste insuffisante pour cette espèce, étant donné la contribution de la "signature" spectrale de son environnement le plus proche.

V-3) Les implications pratiques

Pour une étude très fine et pointue, il serait préférable d'étudier les "signatures" spectrales des espèces forestières en question au laboratoire à l'aide d'un spectromètre, assisté par une étude de corrélation entre différents filtres optiques, avant d'opter pour les filtres optiques à utiliser dans l'acquisition de l'information.

Une augmentation de la résolution pour le survol est préconisée pour qu'un défaut de mise en registre qui ne dépasse pas un ou deux pixels, soit compensé par le filtre "médiane focale". Une façon d'augmenter la résolution, serait d'utiliser l'objectif zoom à sa focale maximale: 75 mm au lieu de la focale normale 20 mm. Cette augmentation de la résolution peut engendrer des répétitions de lignes de vols. Dans ce cas on peut utiliser deux caméras vidéo à haute résolution puisque chacune est limitée à trois filtres optiques. Ceci pour des raisons de synchronisation en liaison avec le type de semi-conducteur constituant le module de CCD.

Une dépendance se manifeste par une différence majeure des propriétés de réflexion des surfaces végétales dans le visible par rapport au proche infrarouge. Pour les longueurs d'onde du visible, la réflexion serait de type surfacique et dépendrait principalement du type du couvert. Dans le proche infrarouge, la transmission dans le couvert végétal serait plus forte d'où l'importance des caractères volumiques (densité et hauteur) du couvert végétal (Vincent, 1984). Selon ce même auteur, ces différences ont été observées mais peu d'éléments nous permettent d'en vérifier les causes. D'où l'importance de considérer les données spectrales des branches prises directement dans l'arbre comme une vérité-terrain pour une meilleure simulation d'un survol vertical. Cela est possible grâce à un hélicoptère, un bras mécanique ou le même avion utilisé dans l'acquisition des images vidéo avec l'objectif zoom de la caméra multibande. On pourrait ainsi avoir un arbre dans toute l'image pour avoir le même effet de l'empilement dans le proche infrarouge, tout en exploitant la redondance des images dans le temps afin de diminuer le bruit. Toutefois il faut prendre en considération toutes les implications pratiques que peut engendrer une augmentation de la résolution spatiale telle que la contribution amoindrie du vide entre les branches dans la nouvelle "signature" spectrale d'un arbre.

CHAPITRE VI

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

Les avantages techniques et économiques apportés par le système VAM laissent prédire un potentiel supérieur à celui des capteurs linéaires à barette et à miroir tournant. Ce système a donné des résultats intéressants depuis les premiers essais d'application à la surveillance des cultures (Manzer *et al.* 1982), en passant par l'astrophysique (Bionta, *et al.* 1988) et les premières applications en foresterie (Nixon, 1985 / King *et al.* 1987). Notre étude a permis d'élargir le champ d'application de cette technique, en utilisant les rapports radiométriques des bandes spectrales dans la discrimination des essences forestières. Ces rapports offrent des conditions supplémentaires que doit vérifier la réponse spectrale des échantillons d'une population donnée, afin d'être identifiable et utilisable dans une procédure de classification dirigée. Cependant, une des limitations qui caractérise le système VAM, est sa faible résolution spatiale en comparaison avec la photographie aérienne traditionnelle (Verreault et Gagnon. 1993). L'effet de ce handicap s'est manifesté dans la présente étude, en un nombre limité de rapports radiométriques de bandes spectrales du survol, notamment pour l'épinette noire, où la moyenne radiométrique rejoignait son homologue de la vérité-terrain à l'intérieur de l'écart-type. En outre, les rapports radiométriques qui vérifient pour une espèce l'hypothèse d'égalité entre deux moyennes, celle du survol et celle de la vérité-terrain, ne la vérifient pas

obligatoirement pour une autre espèce, d'où la difficulté de trouver les meilleures combinaisons de rapports de bandes spectrales citée par Bonn *et al.* 1992.

On peut envisager l'acquisition des "signatures" spectrales en visée oblique par le système VAM pour augmenter la séparabilité des surfaces végétales par rapport à la visée verticale. Les prises de vues obliques viseraient le côté éclairé des arbres, assurant ainsi un éclairage plus uniforme des cibles. De plus, on pourrait intégrer le filtre bleu 450 nm comme sixième filtre avec la possibilité de négliger la correction atmosphérique grâce à une altitude de vol ne dépassant pas 300 m. La technique de la visée oblique pour des données vidéographiques pourrait être intégrée à des survols hivernaux avec la neige recouvrant le parterre forestier et les nouvelles pousses. Ainsi en hiver, une discrimination entre les conifères, sauf pour le mélèze qui perd sa chlorophylle pendant cette saison, pourrait être faite. Les feuillus seraient mis en évidence lors des survols en automne. Les implications pratiques de la présente étude, les recommandations émises et les compromis qu'on peut faire entre la résolution spectrale et la sensibilité lumineuse du capteur pour augmenter le nombre de bandes spectrales ouvrent de nouvelles perspectives pour l'avenir.

BIBLIOGRAPHIE

Becker, F., Billingsley, F. 1978. Principes physiques et mathématiques de la télédétection. Publié par: le centre national d'études spatiales, département des affaires universitaires, Toulouse. 833 p.

Bionta, R.M., Park H.S., Cook K.J. 1988. Quantitative multispectral imaging system. High speed photography, videography and photonics. VI, SPIE, Vol. 981, pp. 299-303.

Bonn, F. 1979. Introduction à la télédétection en écologie et sciences de la terre. Département de géographie. Université de Sherbrooke. Numéro 45, 59 p.

Bonn, F., Rochon, G. 1992. Précis de télédétection. Presses de l'Université du Québec. Vol. 1, pp. 335-336.

Colwell, J.E. 1974. Vegetation Canopy Reflectance. Remote Sensing of Environment. Vol. 3, No. 3, pp. 175-183.

Colwell, J.E. 1963. Basic matter and energy relationships involved in remote reconnaissance. Photogrammetric Engineering. Vol. 26, pp. 761-799.

Crane, R.B. 1971. Preprocessing techniques to reduce atmospheric and sensor variability in multispectral scanner data. Proceeding of 7th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor. MI. USA. pp. 1345.

Crowther, B.C. 1992. *Radiometric calibration of multispectral video imagery*. M.S. Thesis. Department of biological and irrigation engineering. Utah State University, Logan (non publié).

Deschamps P.Y., Herman M., Tanre D. 1981. Influence de l'atmosphère en télédétection des ressources terrestres modélisation et possibilités de correction. Signatures spectrales d'objets en télédétection. Avignon, 8-11 sept, pp. 543-558.

Gausman, H.W. 1974. Leaf reflectance of near infrared. *Photogrammetric Engineering*. Vol. 40, pp. 183-191.

Gausman, H.W. 1977. Reflectance of leaf components. *Remote Sensing of Environment*.. Vol. 6, pp. 1-9.

Gausman, H.W. 1983. A video system to demonstrate interactions of near-infrared radiation with plant leaves. *Remote Sensing of Environment*. Vol.13, pp. 363-367.

George, S.P. 1981. Télédétection non visuelle d'arbre soumis à des contraintes: examen critique. *Rapport technique de foresterie*. Vol. 30, 42 p.

Gerstl, S.A.W. 1986 .Off-Nadir optical remote sensing from satellites for vegetation indentification. *Proceedings of IGRSS' 86 Symposium*. Zurich. pp. 1457-1460.

- Grant, L.** 1987. Review Article: diffuse and specular characteristics of leaf reflectance. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 22, No. 2, pp. 309-322.
- Guyot, G.** 1980. Analysis of factors acting on the variability of the spectral signature of natural surfaces. XIV Congress of the International Society for Photogrammetry. Hambourg, Commission No. VII, pp. 382-393.
- Guyot, G.** 1984. Variabilité angulaire et spatiale des données spectrales dans le visible et le proche infrarouge. I^{le} Colloque international des signatures spectrales d'objets en télédétection. Bordeaux. pp. 45-53.
- Kharuk, V.I.** 1992. Spectral characteristics of vegetation cover : factors of variability. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 13, No. 17, pp. 3263-3272.
- King, D.** 1992. Evaluation of radiometric quality, statistical characteristics, and spatial resolution of multispectral videography. *Journal of Imaging Science and Technology*. Vol. 36. Number 4, pp. 394-404.
- King, D., Jerry, V.** 1990. Development of a multispectral video system and its application in forestry. *Canadian Journal of Remote Sensing*. pp. 445-453.

- Manzer, F.E., Cooper G.R.** 1982. Use of portable video-taping for aerial infrared detection of botato disease. *Plant disease*. No. 66, pp. 665-667.
- Nixon, P.** 1985. Research of multispectral video for remote sensing by the agricultural research service. Proc. 51th Meeting ASP, Washington D.C., pp. 854-859.
- Slater, P.** 1980. Optics and optical systems. *Remote Sensing*. Addison-Wesley, Don Mills, Canada, 575 p.
- Suits, G.H.** 1983. Chapter 2. The nature of electromagnetic radiation. in *Simonett, David S. (Editor). Manuel of Remote sensing second edition*. Vo. 1. American Society of Photogrammetry. The Sheridan Press, Virginia USA, pp. 37-61.
- Thair and Lister.** 1975. The distribution and fine structure of the epicuticular leaf wax of *Pseudotsuga menziesii*. *Journal Canadien de Botanique*. Vol. 53, pp. 1063-1071.
- Vanderbilt, V.C., Robinson, B.F., Biehl, L.L., Bauer, M.E., Vanderbilt, A.S.** 1981. Simulated responses of multispectral scanner over wheat as a function of wavelenght and view/illumination direction. Technical report. SR-PI-04202, NA9-15466, LARS 071580, 11 p.

Verreault, R., Gagnon, F. 1993. La vidéographie aérienne à très haute résolution. 16ième Symposium canadien sur la télédétection. 8ième congrès de l'Association québécoise de télédétection. Sherbrooke, pp. 176-182.

Vincent, P. 1984. Évaluation des réflectances bidirectionnelles par télédétection aéroportée et méthodes de correction. Mémoire présenté pour obtenir la maîtrise ès sciences en télédétection. Université de Sherbrooke. 101 p.

Vincent, R.K. 1973. Spectral ratio imaging methods for geological remote sensing from aircraft and satellites. Proceeding of Symposium on Management and Utilisation of Remotely Sensed Data. A.S.P., Sioux Falls, S.D., USA, pp. 377-397.

Weber, F.P., Polcyn F.C. 1971. Remote sensing to detect stress in forest. Photogrammetric Engineering. Vol. 32, pp. 163-175.

Williams, D.L. 1991. A comparaison of spectral reflectance properties at the needle, branch, and canopy level for selected conifer species. Remote Sensing of Environment. Vo. 35, No. 2 & 3, pp. 79-92.